



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Desarrollo de un sistema de
detección y manipulación de objetos
para un robot de servicio.**

TESIS

Oue para obtener el título de
Ingeniero en Mecatrónica

P R E S E N T A

Edgar de Jesús Vázquez Silva

DIRECTOR(A) DE TESIS

M.I. Marco Antonio Negrete Villanueva



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

Índice general

1. Introducción	7
1.1. Planteamiento del problema	7
1.2. Hipótesis	9
1.3. Objetivos	10
2. Marco teórico	12
2.1. Robots de servicio	12
2.2. Fundamentos básicos de Robots Manipuladores	15
2.2.1. Configuraciones típicas y parámetros característicos .	16
2.2.2. Descripciones espaciales y transformaciones	18
2.2.3. Cinemática directa	20
2.3. Imágenes RGB-D	21
2.4. Algoritmo RANSAC	23
2.4.1. Algoritmo	23
2.4.2. Modelo matemático de un plano	25
2.5. Forma punto-normal y forma general de la ecuación de un plano	26
2.5.1. Modelo del plano definido por tres puntos	27
2.6. Algoritmo PCA	29
2.6.1. Desviación estándar	29
2.6.2. Varianza	30
2.6.3. Covarianza	32
2.6.4. Matriz de covarianzas	33
2.6.5. Eigenvalores y Eigenvectores	33

3. Detección de objetos	36
3.1. Segmentación de planos con RANSAC	37
3.2. Extracción de objetos	40
3.3. Aproximación de orientación de objetos con PCA	41
3.3.1. Adquisición de datos y cálculo de la media	41
3.3.2. Cálculo de la matriz de covarianza	42
3.3.3. Cálculo de rotación del objeto	44
4. Manipulador	49
4.1. Descripción hardware	49
4.1.1. Motores dynamixel Serie MX	50
4.1.2. Características MX-106	54
4.1.3. Características MX-64	55
4.1.4. Características MX-28	56
4.1.5. Características de conexión	60
4.2. Descripción de los elementos del sistema de manipulación	61
4.3. Cinemática directa	64
4.3.1. Teoría trasformaciones y medidas del brazo robotico	64
4.3.2. Implementación (Descripción con ROS)	67
4.3.3. Comparación cinemática directa Denavit-Hartenberg y descripción completa de transformaciones	69
4.4. Determinación del área de trabajo	76
4.5. Cinemática inversa Método Geométrico	83
4.5.1. Desacople cinemático	84
4.6. Cinemática inversa paquetería MoveIt	87
4.7. Planteamiento de la función de costo para el cálculo de la cinemática inversa.	90
5. Integración	92
5.1. Ros	92
5.1.1. Nodos	93
5.1.2. Paquetes	93
5.1.3. Tópicos	93

5.1.4. Servicios	94
5.2. Máquinas de estados	94
5.2.1. Descripción de pruebas de toma de objetos.	95
5.2.2. Pruebas de toma de objetos estado actual.	96
5.2.3. Pruebas de toma de objetos con información de orientación y dimensiones del objeto.	97
5.3. Constitución del robot de servicio Justina	98
5.3.1. Estructura de software del robot Justina.	98
6. Resultados y conclusiones	99
6.1. Extracción de planos.	100
6.1.1. Comparación exactitud y rapidez	109
6.2. Extracción de objetos y sus características	110
6.2.1. Estimación de alturas	111
6.2.2. Adición de la información de dimensiones de los objetos	114
6.3. Cálculo de la orientación del objeto.	114
6.3.1. Prueba de exactitud	114
6.4. Estimación de las dimensiones del área de trabajo.	114
6.4.1. Comparación en tiempo de ejecución de la tarea de manipulación con información del área de trabajo.	114
6.5. Pruebas de manipulación con el robot real	114
6.5.1. Pruebas de manipulación actual.	114
6.5.2. Pruebas de manipulación con información de la orientación.	115
6.5.3. Pruebas de manipulación con información de la orientación e información de dimensiones..	115
7. Conclusiones	116

Agradecimientos

A mi familia,
al laboratorio de Biorobótica,
al Dr. Jesús Savage Carmona,
al Mtro. Marco Antonio Negrete Villanueva,
por su paciencia y apoyo en todo momento.

Se agradece al CONACYT, a través del proyecto 245491, "Laboratorio de Movilidad e Infraestructura Verde para la Eficiencia Energética en Ciudades", por el apoyo recibido en la realización de este documento.

Abstract

El reconocimiento de objetos y la adecuada manipulación de los mismos es una problemática común en el área de la robótica de servicios. El presente documento aborda el diseño de un sistema de manipulación de objetos formado por un brazo robótico de 7DOF, el desarrollo de un algoritmo de visión computacional para reconocer la posición y orientación de los objetos, el desarrollo de la cinemática inversa del brazo robótico y finalmente la planeación de acciones entre la detección de un objeto y su correcta manipulación.

Los algoritmos desarrollados en el presente documento pueden ser utilizados en la segmentación de objetos de manera general, y podrán ser implementados para realizar un seguimiento de peatones o usuarios de bicicletas en un sistema de monitoreo para bicicletas ecológicas como parte del proyecto ”Laboratorio de Movilidad e Infraestructura Verde para la Eficiencia Energética en Ciudades”.

Capítulo 1

Introducción

En los últimos años, el área de la robótica y sus múltiples aplicaciones se han expandido a pasos agigantados, tal es el caso de la robótica de servicios. Años atrás la idea de tener un robot capaz de ayudar en las tareas del hogar sólo era concebida gracias a la ciencia ficción; hoy en día es una total realidad. Un robot es un sistema mecánico controlado automáticamente, reprogramable, mutiproposito, con diversos grados de libertad, el cual puede ser fijo o móvil [1]. Actualmente existe un auge en utilizar a los robots como auxiliares en las actividades domésticas, un área llamada: “robótica de servicio”. Sin embargo el área de la robótica de servicios y robots de asistencia comprende un gran rango de problemáticas.

1.1. Planteamiento del problema

Los robots enfrentan problemáticas a la que cualquier humano está sometido día a día: ambientes dinámicos, características de entornos no estandarizados, incertidumbre ante escenarios desconocidos. Dada la naturaleza de esta disciplina científica han surgido diversas líneas de investigación que abarcan estas problemáticas. La mecánica, la electrónica, la informática, la inteligencia artificial y la ingeniería de control, son algunas de las disciplinas involucradas. La robótica se ayuda de este estas disciplinas

para resolver problemas particulares, por ejemplo un robot de servicios debe ser capaz: de reconocer y manipular objetos en diferentes ubicaciones y desde diferentes alturas, de tener locomoción en diferentes tipos de superficies, de interactuar con un humano, de distinguir diferentes personas. Por último, pero no menos importante, el funcionamiento seguro de estos sistemas en ambientes dinámicos es un requisito fundamental para su futura aceptación y aplicabilidad.

La creación de estos sistemas autónomos requiere la integración de un gran conjunto de capacidades y tecnologías. Los ejemplos de capacidades incluyen la interacción humano-robot (habla, identificación de personas, seguimiento de personas, entre otros), navegación, planificación de acciones, control de comportamientos, detección y reconocimiento de objetos, manipulación de objetos o seguimiento de objetos. Con respecto a las tecnologías se requerido la aplicación de sensores RGB-D, cámaras estereoscópicas, sensores láser, entre otros.

Con respecto a la inteligencia, los sistemas deben contener métodos de planificación de acciones y comportamientos adaptables. Los procedimientos apropiados deben, por ejemplo, permitir al operador del robot enseñar nuevos comportamientos y entornos vía comandos de voz o gestos. Los futuros hogares probablemente contendrán dispositivos electrónicos más inteligentes capaces de comunicarse entre si incluyendo el uso de internet como base común de conocimientos, de modo que los robots desempeñarán un papel más importante.

Entre todas estas líneas de investigación es imprescindible contar con un robot que sea capaz de interactuar con los objetos en el mundo real, por ello es necesario contar un sistema que pueda reconocer los objetos y su posición adecuadamente. Sin embargo, esta línea de investigación atiende a problemáticas muy concretas, en el mundo real los robots se enfrentan con condiciones dinámicas en el ambiente, por ejemplo al pedir a un robot que tome un objeto y pueda llevárselo hasta nosotros, el primer problema al

que nos enfrentamos es conocer la posición del objeto (la cual será diferente en cada ocasión), posteriormente, si deseamos localizar dos objetos del mismo tipo, estos no serán reconocidos de igual manera por el robot debido a las condiciones de luz, a los cambios de forma, y a los cambios de apariencia.

Dadas las características antes descritas, es preciso estimar la probabilidad de que un robot pueda manipular correctamente los objetos. Para ello es necesario dividir la tarea en operaciones: la primera de ellas consiste en estimar la posición del objeto, tener un indicador que nos ayude a determinar cuál es la mejor forma de tomar un objeto y conocer la probabilidad de que el robot haya reconocido un objeto exitosamente. Otra de las operaciones necesarias es llevar el actuador final del brazo robótico a una posición (x , y , z) deseada. Por último es necesario contar con un planeador de acciones para coordinar cada uno de los eventos dentro de la tarea.

Podemos observar que las problemáticas son variadas, sin embargo podemos reducir el problema principal en tres tareas secundarias: Detectar un objeto, obtener una aproximación de cuál será la mejor manera de tomarlo y caracterizar el sistema en conjunto para obtener un parámetro de confiabilidad.

1.2. Hipótesis

- Un sistema de visión computacional con implementación de un algoritmo de análisis de componentes principales podrá indicarnos cuál es la mejor orientación para tomar un objeto y por tanto mejorará manipulación de objetos.

1.3. Objetivos

Objetivo general

Implementar un conjunto de algoritmos de visión computacional que mejore el sistema de detección y manipulación de objetos formado por un sensor kinect y un brazo robótico de 7DOF en un robot de servicios.

Objetivos específicos

- Implementar un algoritmo de visión computacional para identificar un plano.
- Implementar un algoritmo de visión computacional para determinar la posición de un objeto.
- Implementar un algoritmo de análisis de componentes principales para identificar la orientación de los objetos.
- Calcular la cinemática inversa de un brazo robótico de 7DOF para llevarlo a una posición deseada (x, y, z, roll, pitch, yaw).
- Caracterizar el sistema de manipulación de objetos usando un modelo bayesiano.

En el capítulo 3 de este documento se aborda la manera en que se desarrollaron los algoritmos de visión computacional para realizar la extracción de un plano, identificar la posición de un objeto, implementar un algoritmo de Análisis de Componentes Principales para obtener cual será la mejor orientación para tomar un objeto a partir de su forma. En el capítulo 4 se describe el sistema de manipulación utilizado. Se comienza por conocer las características de los actuadores utilizados, se obtienen las ecuaciones correspondientes a la cinemática de los brazos para llevarlo hasta una posición (x, y, z, roll, pitch, yaw) deseada. En el capítulo 5 se realiza la integración de las tareas antes mencionadas, la plataforma sobre la cual se desarrolló el sistema y se describe el desarrollo del modelo probabilístico utilizado para mejorar la manipulación de objetos en un robot de servicios.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Robots de servicio

Dado que este trabajo se centrará en los robots de servicio es importante mencionar que un robots de servicio es un robot capaz de realizar tareas de la vida diaria en un ambiente similar al de un hogar real. Actualmente el desarrollo de este tipo de robot está guiado por la competencia internacional Robocup @Home.[2] Esta categoría promueve la incorporación de habilidades robóticas avanzadas para la interacción con los humanos y con el entorno de operación. Esta competencia se enfoca a desarrollar habilidades en los robots de servicios. Ejemplos de estas habilidades son la localización y navegación segura en ambientes no controlados, la comunicación natural humano-robot por voz y gestos y habilidades visuales para el reconocimiento y la manipulación de objetos.[3]

Los robots de servicio enfrentan diversos retos: desarrollar tareas en ambientes dinámicos, características de entornos no estandarizados, incertidumbre ante escenarios desconocidos. Dadas las condiciones en que estos robots operan los programadores y desarrolladores de robots de servicios han optado por dotar a los robots de ciertas capacidades. Por ejemplo el robot Cosero, consta de un sistema de percepción del entorno, un sistema de manipulación, un sistema de interacción humano-robot y un

sistema de planeación de tareas.

Tabla con las características de los robots de servicio.

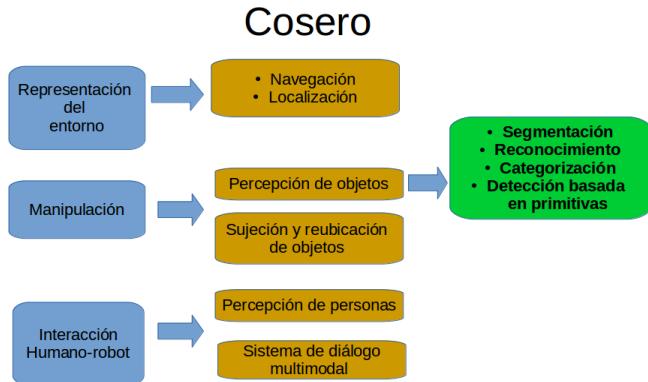


Figura 2.1: Estructura de software del robot Cosero.



Figura 2.2: Estructura de software del robot Markovito.

En particular en una metodología de detección y manipulación de objetos, resulta una tarea fundamental a resolver en los robots de servicio. La idea general de la robótica de servicio doméstico ha existido desde hace mucho tiempo, pero es un tema de investigación relativamente joven. El objetivo de crear robots de servicios útiles y autónomos que puedan interactuar con seres humanos y objetos en el mundo real en un entorno



Figura 2.3: Estructura de software del robot Justina.

natural plantea un gran número de problemas sin resolver en muchas disciplinas científicas.

Recientemente, el progreso en estos campos de investigación, así como el progreso y la normalización en el desarrollo de hardware y software, ha llevado a un aumento en la disponibilidad de recursos, métodos y componentes para el desarrollo de Robots de servicio doméstico . Por ello estamos cada vez más cerca de convivir con robots de servicios de manera exitosa en diversos lugares, por ejemplo hospitales [4], oficinas, construcciones, o tiendas departamentales [5].

Estos desarrollos han sido posibles gracias a herramientas de código abierto como lo es Ubuntu, ya que ha servido como base para el desarrollo de software especializado para robots, por ejemplo ROS [6]. Este conjunto de librerías especializadas para robots pueden llegar a ser muy particulares y estar enfocados a una sola área de investigación de las antes mencionadas, por ejemplo: Carmen [7], un conjunto de librerías y algoritmos de control para navegación de robots, desarrollados por la universidad Carnegie Mellon[8].

En la parte de simulación se cuenta con ejemplos como el USARSim

[9], rviz [10] o Gazebo [11]. Por lo que respecta a los algoritmos de visión computacional existen bibliotecas de código abierto por ejemplo OpenCV [12] el cual tiene un gran campo de aplicaciones[13]. Por lo que corresponde a los kits estándar de hardware, podemos mencionar la construcción de robots de plataforma estándar por ejemplo VolksBot [14] y las plataformas bases por ejemplo ActivRobots [15], Pepper [16], Asimo [17] ha hecho posible desarrollar software de manera más rápida y eficiente.



Figura 2.4: Robot asimo desarrollado por la compañía Honda.

2.2. Fundamentos básicos de Robots Manipuladores

La manipulación adecuada de objetos es una característica imprescindible en los robots de servicio dadas las condiciones de su entorno y las tareas cotidianas que le podemos asignar a dicho robot. Una posible solución a la problemática de la manipulación de objetos es la incorporación de manipuladores seriales a una base móvil; sin embargo se debe tener en cuenta que los objetos a ser manipulados se encuentran en condiciones aleatorias de posición y orientación, estas características implican que el manipulador serial debería ser capaz de alcanzar una posición (x , y , z) con

cualquier orientación (roll, pitch, yaw).

Los robots manipuladores clásicos presentan una configuración antropomórfica serial, que hace semejanza con un brazo humano. La arquitectura típica de un manipulador consiste en una serie de barras rígidas unidas entre sí mediante el uso de articulaciones rotacionales o prismáticas. De manera general cada articulación logra su movimiento gracias a un actuador y a la adición de algunos elementos complementarios como sensores de posición y de velocidad[18].

Los robots manipuladores clásicos están caracterizados, desde el punto de vista mecánico, por una serie de propiedades tales como los grados de libertad, el espacio de trabajo, la rigidez estructural, peso propio y la capacidad de llegar a un punto deseado con exactitud en múltiples repeticiones. Además en los robots manipuladores suelen tomarse en cuenta otras características adicionales: la carga útil máxima y la velocidad de trabajo.



Figura 2.5: Robot serial elaborado por la compañía ABB.

2.2.1. Configuraciones típicas y parámetros característicos

Según la geometría de su estructura mecánica, un manipulador puede ser:

- Cartesiano, cuyo posicionamiento en el espacio se lleva a cabo mediante articulaciones lineales.
- Cilíndrico, con una articulación rotacional sobre una base y articulaciones lineales para el movimiento en altura y en radio.
- Polar, que cuenta con dos articulaciones rotacionales y una lineal.
- Esférico (o de brazo articulado), con tres articulaciones rotacionales.
- Mixto, que posee varios tipos de articulaciones, combinaciones de las anteriores. Es destacable la configuración SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm).
- Paralelo, posee brazos con articulaciones prismáticas o rotacionales concurrentes. Figura 2.3

Los principales parámetros que caracterizan a los robots industriales son:

- Número de grados de libertad. Es el número total de grados de libertad de un robot, dado por la suma de g.d.l. de las articulaciones que lo componen. Aunque la mayoría de las aplicaciones industriales requieren 6 g.d.l., como las de soldadura, mecanizado y almacenamiento, otras más complejas requieren un número mayor, tal es el caso de las labores de montaje.
- Espacio de accesibilidad o espacio (volumen) de trabajo. Es el conjunto de puntos del espacio accesibles al punto terminal, que depende de la configuración geométrica del manipulador. Un punto del espacio se dice totalmente accesible si el efecto final puede situarse en él en todas las orientaciones que permita la constitución del manipulador y se dice parcialmente accesible si es accesible por el efecto final pero no en todas las orientaciones posibles. En la figura inferior se aprecia el volumen de trabajo de robots de distintas configuraciones.
- Capacidad de posicionamiento del punto terminal. Se concreta en tres magnitudes fundamentales: resolución espacial, precisión y

repetibilidad, que miden el grado de exactitud en la realización de los movimientos de un manipulador al realizar una tarea programada.

- Capacidad de carga. Es el peso que puede transportar el elemento terminal del manipulador. Es una de las características que más se tienen en cuenta en la selección de un robot dependiendo de la tarea a la que se destine.
- Velocidad. Es la máxima velocidad que alcanzan el efecto final y las articulaciones.



Figura 2.6: Robot paralelo.

2.2.2. Descripciones espaciales y transformaciones

La cinemática es la ciencia del movimiento que trata el tema sin considerar las fuerzas que lo ocasionan. Dentro de esta ciencia se estudian la posición, la velocidad y la aceleración. En consecuencia, el estudio de la cinemática de manipuladores se refiere a todas las propiedades geométricas y las basadas en los cambios de estas a lo largo del tiempo. Dadas las características de este trabajo solo se abordarán la cinemática directa e inversa, sin llegar a analizar la dinámica del manipulador.

El problema de la cinemática directa se plantea en términos de encontrar una matriz de trasformación que relaciona el sistema de coordenadas ligado al

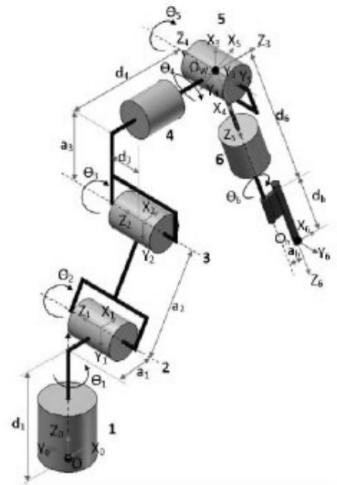


Figura 2.7: Esquema de sistemas de referencia en robot antropomórfico de seis grados de libertad.

cuerpo en movimiento respecto a un sistema de coordenadas que permanece estático y se toma como referencia. Para lograr esta representación se usa la matriz de transformación homogénea con una dimensión 4x4, la cual incluye las operaciones de rotación y translación.

La matriz de transformación homogénea es una matriz de 4x4 que transforma un vector expresado en coordenadas homogéneas desde un sistema de coordenadas hasta otro sistema de coordenadas. La matriz de transformación homogénea tiene la siguiente estructura:

$$T_0^1 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

donde los vectores n , s , a , son vectores ortogonales unitarios que representan la rotación del sistema y p es un vector que describe la posición x , y , z del origen del sistema actual respecto del sistema de referencia.

2.2.3. Cinemática directa

El problema de la cinemática directa consiste en determinar la posición del efecto final en el espacio dado el valor de cada una de las articulaciones. El valor de los ángulos de las articulaciones se determinan con ayuda de sistemas de referencia ubicados en cada una de las articulaciones del robot.

Un robot manipulador está compuesto de un conjunto de enlaces conectados por varias juntas. Las articulaciones pueden ser muy simples, tales como una articulación de revolución o una articulación prismática. Una articulación de revolución es como una bisagra y permite una rotación relativa alrededor de un solo eje coordenado; una junta prismática permite un movimiento lineal a lo largo de un solo eje. En ambos casos podemos observar el que la articulación tiene un solo grado de libertad de movimiento: el ángulo de rotación en el caso de una articulación de revolución, y la cantidad de desplazamiento lineal en el caso de una articulación prismática.

Con el supuesto de que cada articulación tiene un solo grado de libertad, la acción de cada una de las articulaciones se puede describir por un solo número real: el ángulo de rotación en el caso de una articulación de revolución o el desplazamiento en el caso de una junta prismática. El objetivo del análisis de la cinemática directa es determinar el efecto acumulativo de todo el conjunto de variables de la articulación y observarlo en el efecto final.[19]

El análisis cinemático de un manipulador de n -enlaces puede ser extremadamente complejo y las convenciones que se presentan a continuación simplifican el análisis considerablemente.

Un robot manipulador con n grados de libertad tendrá por consecuencia n articulaciones. Se numeran las articulaciones de 1 a n , y se numeran los enlaces de 0 a n , comenzando desde la base en un sistema de referencia fijo. Para esta convención, la articulación i conecta el enlace $i - 1$ al enlace i .

Cuando se acciona la articulación i el enlace se mueve, por lo tanto, el enlace 0 (el primer eslabón) es fijo, y no se mueve cuando las juntas consecuentes son accionadas. Por supuesto, el robot manipulador podría ser móvil (por ejemplo, podría ser montado en una plataforma móvil o en un vehículo autónomo), pero para esta primer parte abordaremos el problema suponiendo una plataforma fija.

2.3. Imágenes RGB-D

En la robótica de servicios resulta imprescindible contar con robots que sean capaces de percibir su entorno, los elementos que los rodean y determinar características de los mismos. Los humanos, dadas estas necesidades, hemos desarrollado el sentido de la vista que nos permite determinar características del entorno y de los objetos que lo componen tales como el color, la forma, las dimensiones ó su ubicación en el espacio.

Para optimizar los movimientos de un robot, no sólo se debe identificar cada objeto que se encuentra en el entorno de trabajo, sino también la posición que estos guardan respecto al robot. Normalmente, la segmentación de objetos de una imagen se logra mediante la segmentación de color, esta segmentación se logra a partir del análisis cromático de los componentes RGB de la imagen obtenida del objeto; sin embargo, este método es poco eficiente debido a que es sumamente susceptible a los cambios en la iluminación. [20]

Por lo tanto, necesitamos considerar una fuente de datos adicional, en este caso la profundidad, para discriminar objetos que no están en el rango de interés. En este documento se reportan los datos obtenidos al resolver este problema con la incorporación de un sensor RGB-D.

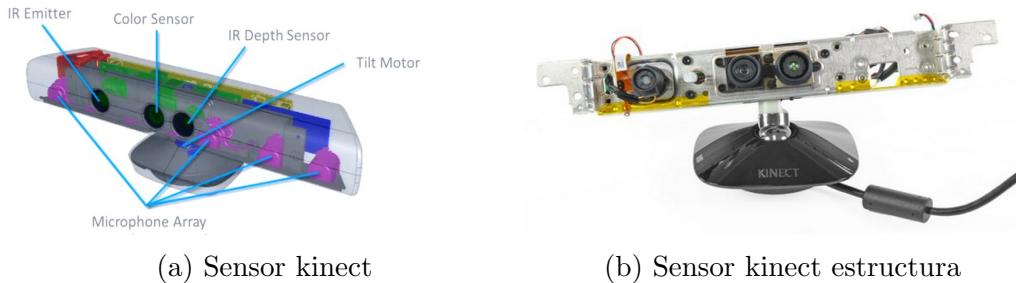
La rápida evolución de esta reciente tecnología ha resultado en el aumento de la calidad de las imágenes, la mejora en la sincronización del color con la profundidad y la disminución del tiempo de muestreo entre cada imagen. En particular, la profundidad de la imagen se obtiene en una matriz resultado de la proyección de rayos infrarrojos sobre los objetos. El sensor cuenta con una cámara infrarroja que obtiene la lectura de los haces infrarrojos reflejados sobre los objetos.

El sensor Kinect incorpora un sensor de profundidad, un cámara de color y un arreglo de cuatro micrófonos que, en conjunto, proporcionan una captura de movimiento de cuerpo completo en 3D. La figura 2.5 muestra la disposición del proyector de infrarrojos (IR), la cámara de color y la cámara IR. El sensor de profundidad consta de un proyector IR combinado con una cámara IR, la cual es un sensor semiconductor de metal-óxido monocromático. El sensor de profundidad es desarrollado por la compañía israelí PrimeSense.

Aunque la tecnología exacta es cerrada, se basa en el principio de la estructura de la luz y su difracción. El proyector IR es un láser IR que pasa a través de una rejilla de difracción y se esparce como una nube de puntos. Dada la geometría de construcción entre el proyector IR y la cámara IR se puede reconstruir un modelo 3D si se observa un punto en el proyector y posteriormente se ubica su correspondiente reflexión en la cámara, esto se puede lograr utilizando triangulación.

Debido a que el patrón de puntos es relativamente al azar, la coincidencia entre la imagen IR y el patrón del proyector puede realizarse de forma directa comparando pequeñas vecindades utilizando, por ejemplo, referencias cruzadas.[21]

El valor de la profundidad se codifica en escala de grises, cuanto más oscuro sea un píxel, más cerca está el punto de la cámara en el espacio, los píxeles negros indican que no se posee información respecto a la distancia



(a) Sensor kinect

(b) Sensor kinect estructura

Figura 2.8: Sensor kinect elaborado por Microsoft.

en ese píxel. Esto puede suceder si los píxeles están demasiado lejos o demasiado cerca de la cámara IR.

2.4. Algoritmo RANSAC

2.4.1. Algoritmo

El algoritmo RANSAC (RANdom Sample And Consensus) fue introducido por primera vez por Fischler y Bolles en 1981, como un método para estimar los parámetros de un determinado modelo a partir de un conjunto de datos contaminados por grandes cantidades de outliers. Un dato es considerado un outlier si no encaja en el modelo propuesto, dentro de un umbral de error que define el valor máximo desviación atribuible al efecto del ruido.

RANSAC selecciona uniformemente al azar un subconjunto de muestras de datos y lo utiliza para crear un modelo de estimación de parámetros. Luego determina si las muestras que están dentro de una tolerancia de error del modelo antes propuesto. Si estas muestras se consideran como parte del modelo generado se agrupan en un conjunto llamado *consenso*. De manera análoga se llama *outliers* al conjunto de los que superan el umbral de error con respecto al modelo. Si el recuento de los datos agrupados en el consenso es suficientemente alto con respecto de los outliers, se considera

que el modelo se ajusta al conjunto de datos, siendo el modelo propuesto un modelo que se aproxima al conjunto total de datos.

A continuación se muestra el seudocódigo básico para el algoritmo RANSAC.

```

Parámetros:
    datos – conjunto de datos observados
    modelo – una propuesta de modelo que puede ajustar al conjunto de datos
    n – el número mínimo de datos con los cuales se considera un buen modelo
    k – el número máximo de iteraciones para algoritmo
    t – el valor del umbral que determinará si un punto se justa al modelo

Salidas:
    mejorAjuste – modelo encontrado con los parámetros o una variable vacía si no se encontró ningún
    modelo que justara.

Inicialización de variables:
    iteraciones = 0
    mejorModelo = vacío
    mejorError = Algo realmente grande

while iteraciones < k do
    Generación del modelo a partir de datos aleatoriamente seleccionados.
    modeloPropuesto = f(datos)
    inliers = 0
    for cada punto in datos and not en inliers do
        calcular error
        if punto ajusta en modeloPropuesto with an error < than t then
            añadir punto a inliers
            errorModelo = errorModelo + error
        end if
    end for

    if número de elementos in inliers is > n then
        esto significa que tenemos un buen modelo
        Verificamos si el modelo calculado supera al mejor modelo calculado con anterioridad.
        if errorModelo < mejorError then
            mejorAjuste = mejorModelo
            mejorError = errorModelo
        end if
    end if
    incrementamos iteraciones
end while
Llegamos al numero de iteraciones k y devolvemos el mejor modelo obtenido.

return mejorAjuste

```

2.4.2. Modelo matemático de un plano

En matemáticas, un plano es una superficie plana, bidimensional que se extiende infinitamente lejos. Un plano es el análogo bidimensional de un punto (dimensiones cero), una línea (una dimensión) y un espacio tridimensional. Los planos pueden surgir como subespacios de algún espacio de dimensión superior, como si las paredes de una habitación estuviesen extendidas infinitamente, o pudieran disfrutar de una existencia independiente por derecho propio, como en el caso de la geometría euclíadiana.

Cuando se trabaja exclusivamente en el espacio euclíadiano bidimensional, se utiliza el artículo definido, por lo que el plano se refiere a todo el espacio. Muchas tareas fundamentales en matemáticas, geometría, trigonometría, teoría de gráficas y representación gráfica se realizan en un espacio bidimensional, o, en otras palabras, en el plano.

En un espacio euclíadiano de cualquier número de dimensiones, un plano está determinado únicamente por cualquiera de los siguientes:

- Tres puntos no colineales (puntos no en una sola línea).
- Una línea y un punto no en esa línea.
- Dos líneas distintas, pero que se cruzan.
- Dos líneas paralelas.

Las siguientes afirmaciones se mantienen en el espacio euclíadiano tridimensional, pero no en las dimensiones superiores, aunque tienen análogos de mayor dimensión:

- Dos planos distintos son paralelos o se intersecan en una línea.
- Una línea es paralela a un plano, lo cruza en un solo punto, o está contenida en el plano.

- Dos líneas distintas perpendiculares al mismo plano deben ser paralelas entre sí.
- Dos planos distintos perpendiculares a la misma línea deben ser paralelos entre sí.

2.5. Forma punto-normal y forma general de la ecuación de un plano

De manera análoga a la forma en que se describen las líneas en un espacio bidimensional utilizando una forma de pendiente de puntos para sus ecuaciones, los planos en un espacio tridimensional tienen una descripción natural que utiliza un punto en el plano y un vector ortogonal a él (Vector normal) para indicar su *inclinación*.

Específicamente, sea r_0 el vector de posición de algún punto $P_0 = (x_0, y_0, z_0)$, y sea $n = (a, b, c)$ un vector no nulo. El plano determinado por el punto P_0 y el vector n consiste en aquellos puntos P , con el vector de posición r , de tal manera que el vector trazado de P_0 a P sea perpendicular a n . Recordando que dos vectores son perpendiculares si y sólo si su producto punto es cero, se deduce que el plano deseado puede ser descrito como el conjunto de todos los puntos r tales que:

$$n \cdot (r - r_0) = 0 \quad (2.1)$$

(El punto aquí significa un producto punto, no la multiplicación escalar.)
Ampliado esto se convierte

$$A(x - x_0) + B(y - y_0) + C(z - z_0) = 0 \quad (2.2)$$

Que es la forma punto-normal de la ecuación de un plano. Esta es sólo una ecuación lineal

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (2.3)$$

donde:

$$d = -(ax_0 + by_0 + cz_0) \quad (2.4)$$

Es un plano que tiene como vector el vector $n = (a, b, c)$. Esta ecuación familiar para un plano se llama la forma general de la ecuación del plano.

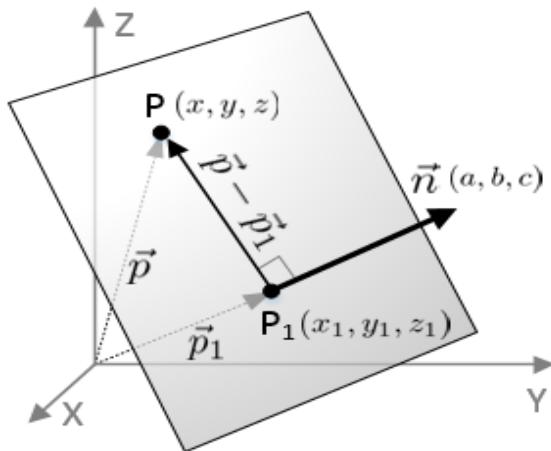


Figura 2.9: Ecuación de un plano definido por un punto y su normal.

2.5.1. Modelo del plano definido por tres puntos

Sea $p_1 = (x_1, y_1, z_1)$, $p_2 = (x_2, y_2, z_2)$, y $p_3 = (x_3, y_3, z_3)$ puntos en el espacio R^3 no-colineales.

Este plano también puede ser descrito por el "punto y un vector normal" de acuerdo a la descripción anterior. Un vector normal adecuado se da por el producto cruz.

$$n = (p_2 - p_1) \times (p_3 - p_1) \quad (2.5)$$

Y el punto r_0 puede considerarse como cualquiera de los puntos dados p_1, p_2 o p_3 (o cualquier otro punto en el plano).

Distancia desde un punto a un plano.

Para un plano $\Pi : ax + by + cz + d = 0$ y un punto $P_1 = (x_1, y_1, z_1)$ no necesariamente en el plano, la distancia más corta de P_1 al plano es

$$D = \frac{|ax_1 + by_1 + cz_1 + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (2.6)$$

De lo cual podemos observar que el punto p_1 se encuentra en el plano si y sólo si $D = 0$.

Si $\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} = 1$ significa que a, b , y c están normalizados, entonces la ecuación se convierte en:

$$D = |ax_1 + by_1 + cz_1 + d| \quad (2.7)$$

2.6. Algoritmo PCA

El Análisis de Componentes Principales (PCA) ha sido llamado Uno de los resultados más valiosos de la álgebra lineal. PCA Se usa abundantemente en muchas formas de análisis, desde la neurociencia a la computación gráfica debido a que es un método simple. El PCA proporciona una metodología para reducir un conjunto de datos complejos a una dimensión inferior.

El algoritmo PCA tiene sus bases en las estadísticas y parte de la idea de que se cuenta con un gran conjunto de datos, y desea analizar ese conjunto en términos de las relaciones entre los puntos individuales dentro de ese conjunto de datos. Se pretende analizar algunas de las medidas que podemos calcular en un conjunto de datos, y lo que estas medidas dicen acerca de los datos en sí.

El tema entero de las estadísticas se basa en la idea de que usted tiene este gran conjunto de datos, Y desea analizar ese conjunto en términos de las relaciones entre un puntos de ese conjunto y el resto de los datos. A continuación se intenta explicar las matemáticas detrás de PCA.

2.6.1. Desviación estándar

La desviación estándar es una medida de la dispersión de un conjunto de datos respecto de la media. Se calcula como la raíz cuadrada de la varianza, determinando la variación entre cada punto perteneciente al conjunto de datos respecto a la media. Si los puntos de datos están más lejos de la media, hay una desviación más alta dentro del conjunto de datos.

Dado que la desviación estándar puede ser interpretada como una medida de incertidumbre cuando calculamos el valor de esta en un grupo repetido de medidas nos da la precisión de éstas. Cuando se va a determinar si un grupo de medidas está de acuerdo con el modelo teórico, la desviación estándar

de esas medidas es de vital importancia: si la media de las medidas está demasiado alejada de la predicción (con la distancia medida en desviaciones estándar), entonces consideramos que las medidas contradicen la teoría. Esto es coherente, ya que las mediciones caen fuera del rango de valores en el cual sería razonable esperar que ocurrieran si el modelo teórico fuera correcto. La desviación estándar es uno de tres parámetros de ubicación central; muestra la agrupación de los datos alrededor de un valor central (la media o promedio).

Por tanto para calcular la desviación estándar primero debemos calcular la media del conjunto de datos.

Cálculo de la media de un conjunto de datos.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (2.8)$$

Donde n es el numero total de datos contenido en la muestra.

Cálculo de la desviación estándar.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{(n - 1)}} \quad (2.9)$$

2.6.2. Varianza

La noción de varianza se suele emplear en el ámbito de la estadística. Es utilizada para identificar a la media de las desviaciones cuadráticas de una variable de carácter aleatorio, considerando el valor medio de ésta.

La varianza de las variables aleatorias, por lo tanto, consiste en una

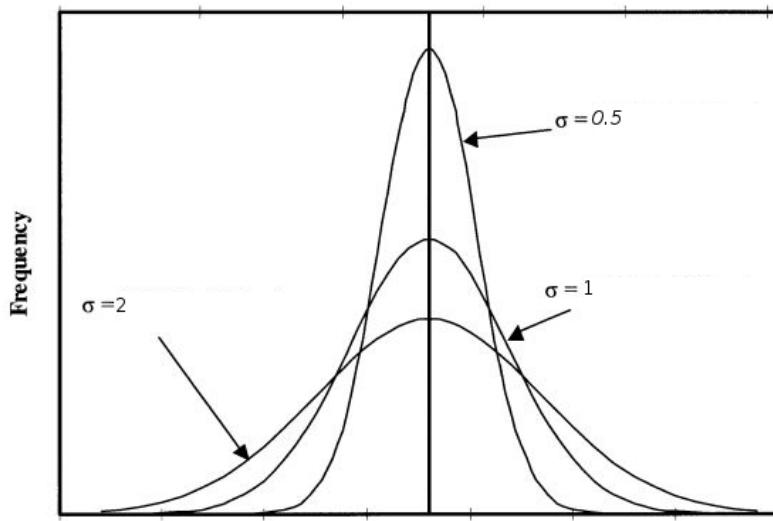


Figura 2.10: Distribución normal con media cero y diferentes desviaciones estándar.

medida vinculada a su dispersión. Se trata del valor esperado del cuadrado de la desviación de esa variable considerada frente su media y se mide en una unidad diferente. Por ejemplo: en los casos en que la variable mide una distancia en kilómetros, su varianza se expresa en kilómetros al cuadrado.

Cabe destacar que las medidas de dispersión (también identificadas con el nombre de medidas de variabilidad) se encargan de expresar la variabilidad de una distribución por medio de un número, en los casos en que las diferentes puntuaciones de la variable están muy alejadas de la media. A mayor valor de la medida de dispersión, mayor variabilidad. En cambio, a menor valor, más homogeneidad.

Por lo que respecta a su representación matemática se puede expresar como el cuadrado del valor de la desviación estándar, como se muestra a continuación.

$$s = \sigma^2 \quad (2.10)$$

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{(n - 1)} \quad (2.11)$$

2.6.3. Covarianza

Las dos últimas medidas que hemos observado son puramente uni-dimensionales. Conjuntos de datos como este podrían ser: alturas de todas las personas en la sala, las calificaciones para el último examen, etc. Sin embargo, muchos conjuntos de datos tienen más de una dimensión y el objetivo del Análisis de Componentes Principales son estos conjuntos de datos. En tal caso es importante observar si existe alguna relación entre las diferentes dimensiones. Por ejemplo, podríamos tener como nuestro conjunto de datos tanto la altura de todos los estudiantes en una clase, y la calificación que recibieron en un examen.

Podríamos entonces realizar un análisis estadístico para ver si la altura de un estudiante tiene algún efecto en su calificación. La desviación estándar y la varianza sólo funcionan en una dimensión, de modo que podríamos solamente calcular la desviación estándar para cada dimensión del conjunto de datos de forma independiente de las otras dimensiones. Sin embargo, es útil tener una medida similar para mucho las dimensiones varían de la media con respecto a la otra. La covarianza es tal medida. Covarianza siempre se mide entre 2 dimensiones. Si se calcula la covarianza entre una dimensión y sí, se obtiene la diferencia.

Por lo tanto, si se tiene un conjunto de datos en 3 dimensiones (x, y, z) , entonces se podría medir la covarianza entre: las dimensiones (x, y) , las

dimensiones (x, z) y las dimensiones (y, z) . Como se puede observar la medición de la covarianza entre (x, x) , (y, y) o (z, z) se puede reducir a calcular la varianza de cada dimensión respectivamente. La fórmula para la covarianza es muy similar a la fórmula para la varianza. La formula:

$$var(X) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(X_i - \bar{X})}{(n - 1)} \quad (2.12)$$

$$cov(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{(n - 1)} \quad (2.13)$$

2.6.4. Matriz de covarianzas

Cuando se dispone de un conjunto de datos multidimensionales la información obtenida de los cálculos de las covarianzas se dispone en forma de matriz para facilitar su manejo, tal matriz es llamada *Matriz de covarianzas*. La matriz de covarianzas es de dimensiones $n \times n$ donde n es el número de dimensiones totales en el conjunto de datos.

A continuación se muestra la matriz de covarianzas para un conjunto de datos de 3 dimensiones, llamadas x, y , y z .

$$C = \begin{bmatrix} cov(x, x) & cov(x, y) & cov(x, z) \\ cov(y, x) & cov(y, y) & cov(y, z) \\ cov(z, x) & cov(z, y) & cov(z, z) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

2.6.5. Eigenvalores y Eigenvectores

Se conocen como valores propios de una matriz al conjunto de valores que resuelven la ecuación:

$$|A - \lambda I| = 0 \quad (2.15)$$

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (2.16)$$

También puede observarse que λ es un vector de valores escalares que a su vez son solución del polinomio de grado n . Donde n es la dimensión de la matriz A :

Polinomio característico.

$$|A - \lambda I| = (\lambda_1 - \lambda)(\lambda_2 - \lambda)(\lambda_3 - \lambda)\dots(\lambda_n - \lambda) \quad (2.17)$$

Por lo tanto, existe un eigenvector asociado a cada uno de los valores propios de la matriz A

$$(A - \lambda I)v = 0 \quad (2.18)$$

Para encontrar el valor de los vectores característicos de la matriz A se determinan los valores característicos de la matriz A se resuelve la ecuación:

$$\begin{aligned}
(A - \lambda_1 I) \vec{v}_1 &= 0 \\
(A - \lambda_2 I) \vec{v}_2 &= 0 \\
&\vdots \\
&\vdots \\
(A - \lambda_3 I) \vec{v}_n &= 0
\end{aligned} \tag{2.19}$$

Es importante observar que el conjunto de todos los vectores propios asociados a un valor propio dado \vec{E}_λ , junto con el vector 0 , forman un espacio vectorial.

Por lo tanto, \vec{E}_λ representa un subespacio de R^n porque es el espacio solución de un sistema homogéneo de ecuaciones lineales y está conformado por matrices columna \vec{v} de $nx1$ que pertenecen a R^n .

Los vectores característicos $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3, \dots, \vec{v}_n$, asociados a los valores característicos distintos $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ de la matriz A, **son linealmente independientes, y este conjunto es una base en R^n** . Si la matriz A es simétrica y real, entonces la base es ortogonal.

Es importante resaltar estas dos características puesto que la aplicación que se desarrollará en este trabajo se basa en el principio de la independencia lineal de los vectores propios y que estos construyen una base ortogonal del conjunto de datos observados.

Capítulo 3

Detección de objetos

En este capítulo se trata el desarrollo de los algoritmos propuestos en la metodología de este trabajo. Se comenzará con los desarrollos realizados en el ámbito de la visión computacional:

- Segmentación de planos
- Extracción de planos
- Segmentación de objetos
- Cálculo del centroide de un objeto
- Aproximación a la orientación de un objeto

Posteriormente se abordarán los temas respectivos la cinemática de un brazo robótico de 7DOF. En este apartado abordaremos la cinemática directa del mismo y como trabajo futuro queda la cinemática inversa del mismo.

Es importante mencionar que los desarrollos reportados en este trabajo fueron realizados en el framework para el desarrollo de software para robots, ROS por sus siglas en inglés. Alojado en el sistema operativo Ubuntu.

3.1. Segmentación de planos con RANSAC

Para el desarrollo del algoritmo RANSAC se utilizó el sensor Kinect dado que este sensor, además de una imagen de color, proporciona información sobre la profundidad de los objetos. Con un manejo adecuado de ambos datos se pueden conseguir avances notables en el campo de la visión computacional.

Para el desarrollo del algoritmo se hizo uso de la información de profundidad de los objetos.

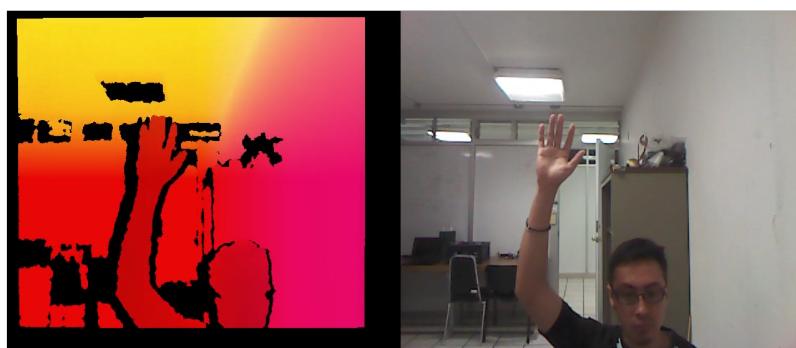


Figura 3.1: Imagen típica de la información otorgada por el sensor Kinect.

Se desarrolló un programa en lenguaje C++ para segmentar los planos. La información de profundidad entregada por el Kinect, se da en una matriz donde cada elemento i, j contiene la información de profundidad obtenida por el sensor, como se muestra a continuación:

Cada elemento de la matriz contiene información de un punto $p = (x, y, z)$ donde el haz infrarrojo fue reflejado, esto nos permite conocer la distancia a la cual se encuentra un objeto, o su superficie. La información que nos entrega el sensor en forma de matriz es de dimensiones 640×480 por tanto consta de 307,200 elementos en total. Dentro de este conjunto de datos procura encontrar las superficies planas.

Se programó el algoritmo RANSAC para extraer planos en C++, el código se puede consultar en la página. ??

Para la correcta implementación del algoritmo fue necesario tomar algunas consideraciones, por ejemplo: descartar del procesamiento todos aquellos píxeles que no proporcionen información relevante de profundidad, la construcción de una clase para generar planos.

Para la construcción de planos se tomaron tres puntos aleatorios y se construyeron dos vectores a partir de los puntos y se realizó el producto cruz entre estos.

$$\begin{aligned} p_1 &= \text{rnd}(\text{datos}) \\ p_2 &= \text{rnd}(\text{datos}) \\ p_3 &= \text{rnd}(\text{datos}) \\ \vec{v}_1 &= p_1 - p_2 \\ \vec{v}_2 &= p_1 - p_3 \\ \vec{N} &= \vec{v}_1 \times \vec{v}_2 \end{aligned}$$

Conocemos la ecuación general del plano:

$$\Pi : Ax + By + Cz + D = 0 \quad (3.1)$$

donde: A, B, C son las componentes del vector normal respectivamente y D la podemos calcular como:

$$D = (A * p_1.x + B * p_1.y + C * p_1.z) \quad (3.2)$$

Por lo tanto con tres puntos seleccionados aleatoriamente tenemos un

modelo de plano generado aleatoriamente. Lo cual es el primer requerimiento para el algoritmo.

Posteriormente se comparó el resto de la información con ese modelo propuesto aleatoriamente y verificamos que tan buen modelo es. Para ello calculamos la distancia euclíadiana de cada punto al plano propuesto, si la distancia es menor que cierto umbral lo consideramos como parte del modelo e incrementamos el numero de puntos que empatan con el modelo inliers:

Del mismo modo se buscaba que el numero de inliers que empataran con el modelo fuera al menos el 60 % del total de datos. En los resultados se trata este tema con mayor profundidad.

Observamos que el algoritmo opera bien con un numero máximo de iteraciones = 70, y con un umbral de error de 2 cm.

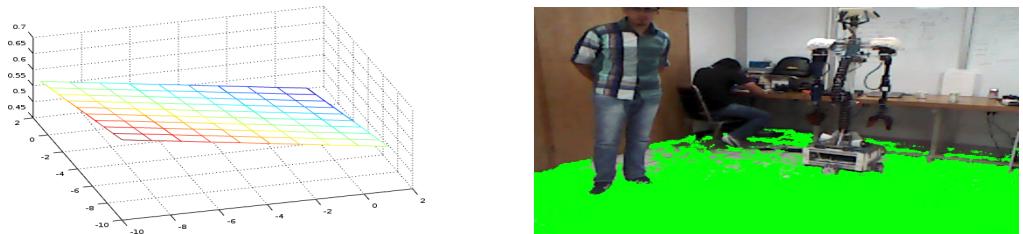
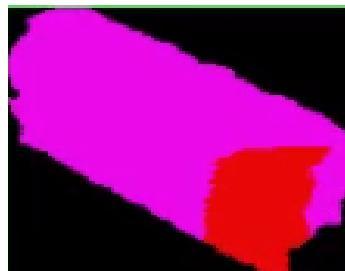


Figura 3.2: Planos y su representación en 3D.

Por ahora el algoritmo no restringe su búsqueda a planos horizontales o verticales, quedá como trabajo futuro el desarrollo de una búsqueda selectiva de planos con características similares a una mesa, destacando características de horizontalidad y altura.



(a) Extracción del color objeto.



(b) Información de profundidad del objeto.

Figura 3.3: Extracción de información del objeto.

3.2. Extracción de objetos

Una vez que se encontró la nube de puntos perteneciente al modelo, se prosiguió a ubicar espacialmente los objetos que se encontraban sobre el plano. Se realizó la extracción de objetos con las siguientes restricciones:

- $p_n = \text{null} \forall p_n \in \Pi$
- $p_n = \text{null} \forall p_n.z < \text{Height}(\Pi)$
- $p_n = \text{null} \forall p_n.x > 0,50[m]$

De otro modo esto sería igual a:

- Extracción de los puntos pertenecientes al plano.
- Extracción de los puntos por debajo del plano.
- Extracción de los puntos más allá de 40 respecto al punto más cercano en x.

Posterior a este proceso tenemos como resultado un conjunto de puntos reflejados sobre un objeto sólido con las distancias proyectadas sobre los tres ejes coordenados respecto del robot Justina.

3.3. Aproximación de orientación de objetos con PCA

El análisis de componentes principales se usa abundantemente en muchas formas de análisis de datos. En este caso se utilizará como una metodología para reducir un conjunto de datos a una dimensión inferior. Más concretamente la forma en que podemos obtener una base ortogonal del conjunto de datos, que represente la distribución de los puntos proyectados sobre el objeto. Esta base, representará la dirección de la distribución de los puntos del objeto, y por tanto encontraremos la dirección del objeto mismo respecto al robot.

3.3.1. Adquisición de datos y cálculo de la media

La adquisición de datos se realizó mediante la extracción de los puntos pertenecientes al objeto. Cada uno de los datos perteneciente al conjunto de puntos posee tres características:

- La distancia al objeto proyectada sobre el eje x
- La distancia al objeto proyectada sobre el eje y
- La distancia al objeto proyectada sobre el eje z

Por lo tanto, de una nube de puntos como la mostrada en la figura () podemos extraer medidas de dispersión, y medidas de tendencia central. Se partió con el cálculo de la media de los datos. $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$. El punto $P(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ representa el centroide del objeto. Conociendo este punto podemos conocer la ubicación espacial del objeto respecto del robot y determinar si es manipulable (si se encuentra dentro del área de trabajo) y conocer las coordenadas a donde deberíamos llevar el efecto final de nuestro manipulador para manipularlo.

Para realizar el cálculo de la media se cuantifico el número de puntos pertenecientes al objeto, (n). Posteriormente, para todos los puntos pertenecientes al conjunto n se sumaron sus valores en $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$, respectivamente. Y posteriormente se dividieron entre n .

```

for cada punto in datos do
     $X_{total} = X_{total} + dato_x$ 
     $Y_{total} = Y_{total} + dato_y$ 
     $Z_{total} = Z_{total} + dato_z$ 
end for

 $\bar{X} = \frac{X_{total}}{n}$ 
 $\bar{Y} = \frac{Y_{total}}{n}$ 
 $\bar{Z} = \frac{Z_{total}}{n}$ 

return  $P(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ 
```



Figura 3.4: Segmentación de un objeto y su correspondiente centroide (punto verde).

3.3.2. Cálculo de la matriz de covarianza

Dada una variable estadística n-dimensional ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$), llamaremos matriz de covarianzas a la matriz cuadrada, $n \times n$, que disponga

en su diagonal principal de las varianzas de cada una de las distribuciones marginales unidimensionales, y en los elementos no-diagonales (i, j) de las correspondientes covarianzas entre cada dos variables S_{ij} .

Para ello se hizo uso de las expresiones matemáticas correspondientes:

$$var(X) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(X_i - \bar{X})}{n} \quad (3.3)$$

$$cov(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n} \quad (3.4)$$

A continuación se anexa en código correspondiente al cálculo de las varianzas y covarianzas.

```

1 //Calculate covariance matrix
2 for(int j = 0; j < object.rows; j++)
3     for (int i = 0; i < object.cols; i++)
4     {
5         px = object.at<cv::Point3f>(j , i );
6         if ( px != cv::Point3f(0.0, 0.0, 0.0) && px != cv::Point3f(0, 255, 0))
7         {
8             var_x += pow( (px.x - centroid[0]), 2 );
9             var_y += pow( (px.y - centroid[1]), 2 );
10            var_z += pow( (px.z - centroid[2]), 2 );
11            cov_xy += ( px.x - centroid[0] )*( px.y - centroid[1] );
12            cov_xz += ( px.x - centroid[0] )*( px.z - centroid[2] );
13            cov_yz += ( px.y - centroid[1] )*( px.z - centroid[2] );
14            n++;
15        }
16    }
17
18 var_x /= n;
19 var_y /= n;
20 var_z /= n;
21
22 cov_xy /= n;
23 cov_xz /= n;
24 cov_yz /= n;
```

```

25
26 cov_matrix << var_x , cov_xy , cov_xz ,
27           cov_xy , var_y , cov_yz ,
28           cov_xz , cov_yz , var_z ;
29

```

Listing 3.1: Cálculo de varianzas y covarianzas

Posteriormente se propuso a encontrar los valores de los vectores propios asociados a la matriz de covarianzas. En la literatura existen múltiples métodos numéricos para la solución de esta problemática, como la puesta a prueba de dichos algoritmos no es el propósito de este trabajo se optó por utilizar la librería **eigen**. Por tanto, una vez construida la matriz de covarianzas M, se utiliza la instrucción:

```

1 Eigen :: SelfAdjointEigenSolver<Eigen :: MatrixXf> eig(cov_matrix);
2

```

Listing 3.2: Cálculo de varianzas y covarianzas

La instrucción *Eigen::SelfAdjointEigenSolver;Eigen::MatrixXf;* nos devuelve un objeto *eig* cuyos atributos son *eigenvalues()* y *eigenvectors()*. Con ayuda de esta librería podemos obtener fácilmente los eigenvectores de la matriz M. Es importante mencionar que el atributo *eigenvectors()* del objeto *eig* se encuentra normalizado; por lo tanto es conveniente darle un escalamiento relacionado con la dispersión de los datos. De este modo se optó por multiplicar cada uno de los eigenvectores por su correspondiente valor de desviación estándar.

3.3.3. Cálculo de rotación del objeto

Una vez que se obtuvieron los eigenvectores de la matriz de covarianzas estos indican las direcciones en los cuales tiene una mayo distribución la nube de puntos del objeto en cuestión. Por la naturaleza de los eigen-vectores y al tratarse de un espacio tridimensional, estos ejes forman un sistema ortogonal; por lo tanto son perpendiculares entre sí.



Figura 3.5: Segmentación de un objeto y sus correspondientes ejes principales (rojo).

Por tal motivo basta con conocer los cosenos directores de cada uno de los eigenvectores con el eje coordinado del robot, comparalos en magnitud y determinar los ángulos roll, pitch y yaw del objeto con respecto del robot.

Componentes y cosenos directores de un vector.

Se llama componentes de un vector \vec{A} respecto del sistema de coordenadas con oriegen O y ejes x, y a las proyecciones de \vec{A} sobre los ejes, sea dicho de otro modo, los números:

$$\begin{aligned} a_1 &= x_2 - x_1 \\ a_2 &= y_2 - y_1 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Transladando esta idea al espacio se continua establece que las componentes de un vector en el espacio están determinados por la forma:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= x_2 - x_1 \\
 a_2 &= y_2 - y_1 \\
 a_3 &= z_2 - z_1
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

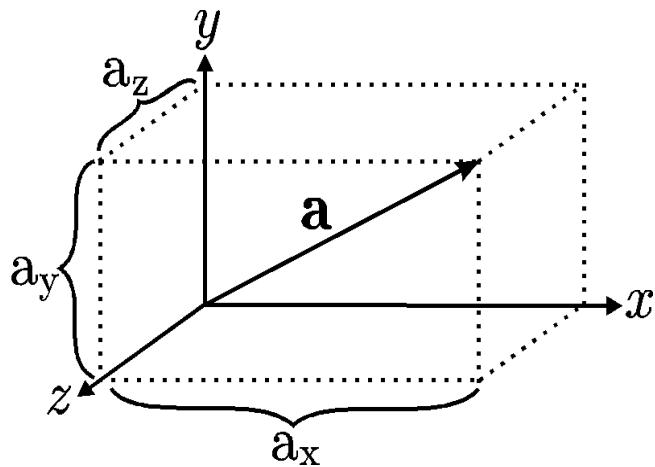


Figura 3.6: Componentes de un vector en el espacio.

En general, se tiene $\vec{A} = (a_1, a_2, a_3)$ para indicar que a_1, a_2, a_3 son las componentes del vector \vec{A} . Esas componentes son números que pueden ser positivos o negativos.

Por lo tanto:

$$|\vec{A}| = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2} \tag{3.7}$$

Expresión que siempre es positiva y da el módulo del vector en función de sus componentes.

Se llaman *cosenos directores* de un vector, respecto de un sistema de coordenadas ortogonales con origen O y ejes x, y, z , a los cosenos de los ángulos que el mismo forma con el sentido positivo de los ejes coordinados.

Los ángulos deben ser tomados entre 0 y π , de manera que los cosenos directores pueden ser positivos o negativos. Si los ángulos del vector $\vec{A}(a_1, a_2, a_3)$ con los respectivos ejes coordinados los representamos por α, β y γ , los cosenos directores se deducen de las fórmulas:

$$a_1 = |\vec{A}| * \cos\alpha \quad (3.8)$$

$$a_2 = |\vec{A}| * \cos\beta \quad (3.9)$$

$$a_3 = |\vec{A}| * \cos\gamma \quad (3.10)$$

De las realciones anteriores se deduce también:

$$\cos\alpha = \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}} \quad (3.11)$$

$$\cos\beta = \frac{a_2}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}} \quad (3.12)$$

$$\cos\gamma = \frac{a_3}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}} \quad (3.13)$$

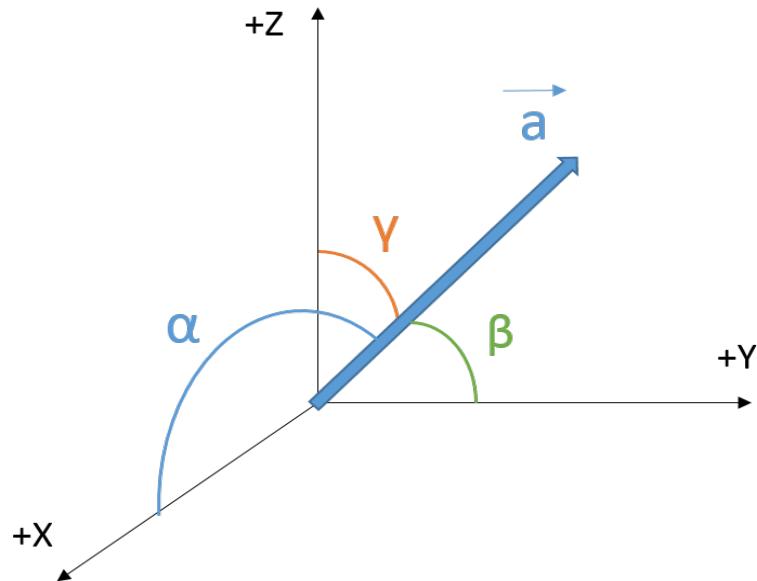


Figura 3.7: Cosenos directores en el espacio.

Capítulo 4

Manipulador

En esta sección se hablará de las características mecánicas del brazo robótico ensamblado en el robot de servicio Justina. Se describirán los elementos que componen el brazo robótico haciendo énfasis en la ubicación de los actuadores y como influye esto en el modelo matemático del mismo.

4.1. Descripción hardware

Los servomotores Dynamixel son un sistema de actuador inteligente desarrollados con el propósito de funcionar como uniones de conexión en un robot o estructura mecánica. Los servomotores Dynamixel están diseñados para ser modulares y soportar la conexión en cadena en cualquier robot o diseño mecánico. Este tipo de servomotores es popular por los beneficios que ofrece: movimientos robóticos potentes y flexibles.

El conjunto de servomotores Dynamixel son un grupo de actuadores de alto rendimiento con reductor, controlador y un protocolo de comunicación completamente integrados. El estado del actuador se puede leer y monitorear a través de un flujo de paquetes de datos. [22]

Los servomotores de la marca Dynamixel, cuentan con diferentes gamas de productos de acuerdo a las necesidades de cada proyecto. El

brazo robótico referente a este documento está constituido únicamente por motores de la gama MX, de la cual se describen las características más sobresalientes a continuación.

4.1.1. Motores dynamixel Serie MX

Los actuadores dynamixel de la serie MX pertenecen a la última generación de actuadores de la compañía Robotis Dynamixel. Están equipados con un procesador Cortex M3 de 32 bits a 72 mhz, un encoder magnético sin contacto con una resolución 4 veces mayor que la serie AX / RX, además ofrecen una velocidad de comunicación de hasta 3 mbps con el nuevo bus TTL 2.0. Cada servomotor cuenta con la capacidad de monitorear su velocidad, temperatura, posición del eje, voltaje y carga.

Por otro lado los motores Dynamixel de la serie MX cuentan con la implementación de un algoritmo de control PID para mantener la posición del eje. Las ganancias del algoritmo de control PID se pueden ajustar individualmente para cada servo, lo que le permite controlar la velocidad y la fuerza de la respuesta del motor. Todos los servos de la serie MX usan un voltaje nominal de 12v. La característica más importante de esta serie de servomotores es que la gestión de la información proveniente del sensor y la ejecución del algoritmo de control de posición son manejados por el microcontrolador integrado del servo. Este enfoque distribuido deja a su controlador principal libre para realizar otras funciones.

En lo que respecta a la parte mecánica, todos los servos DYNAMIXEL son compatibles con una amplia variedad de bridas, acoplamientos y sujetadores lo cual facilita la construcción de cualquier configuración deseada. Este conjunto de elementos mecánicos permite una conexión directa cualquier modelo de servomotores DYNAMIXEL, lo que le permite una gran variedad de configuraciones para cualquier necesidad. Dada la gran variedad de configuraciones, este tipo de elementos de unión y

fijación resultó de gran ayuda mecánica al momento de construir el brazo robótico donde se implementaron los algoritmos descritos en el presente trabajo.

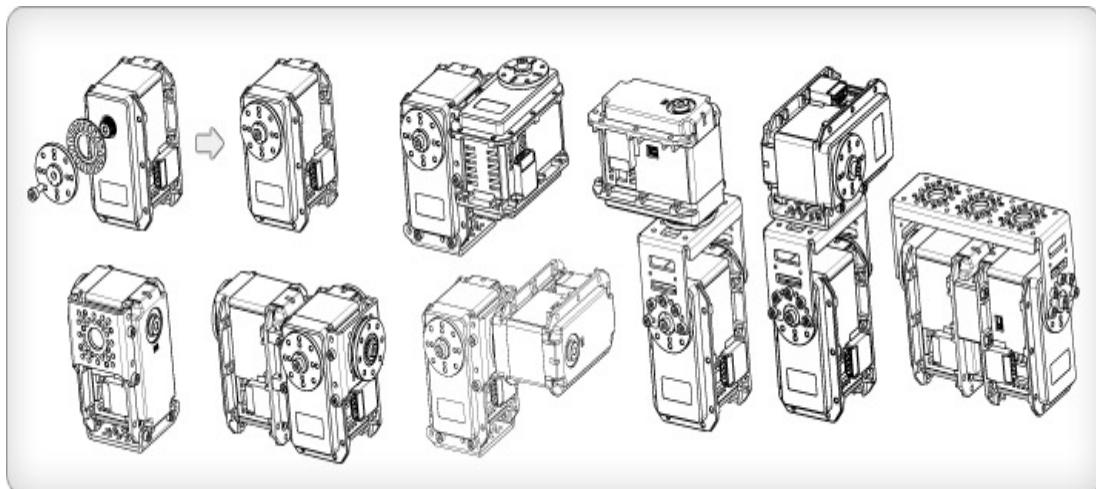


Figura 4.1: Variedad de ensambles para servomotores.

Resumiendo las características de los servomotores de la serie MX, podemos enlistar las siguientes:

- Movimiento sin contacto y detección de posición.
- Interfaz de comunicación TTL estándar.
- Comunicación de alta velocidad de hasta 4.5 Mbps.
- Control PID para autocorrección en posicionamiento.
- Control de par basado en corriente (4096 steps, 2.69mA/step)
- Ahorro de energía (corriente reducida de 100 mA a 40 mA)

Si desea controlar este servo DYNAMIXEL desde un equipo de computo es necesario contar con un dispositivo que facilite la comunicación entre este y el microprocesador de cada uno de los servomotores, el dispositivo que

cumple con esta funcionalidad es el USB2Dynamixel.

El controlador USB2Dynamixel se conecta al puerto USB en una computadora y tiene un puerto de 3 y 4 pines para conectar Dynamixels. El USB2Dynamixel se puede usar con controladores como CM-5 y CM-2 que usan comunicación en serie, además soporta la comunicación en cadena propia de los servomotores Dynamixel. Es importante mencionar que este dispositivo posee un interruptor para seleccionar entre diferentes protocolos de comunicación: RS-232, RS-485, TTL. Por tanto consta de:

- Conector 3P: puerto de comunicación para nivel TTL (para control de serie AX y MX)
- Conector 4P: puerto de comunicación RS-485 (para control de serie DX, RX, EX y MX)

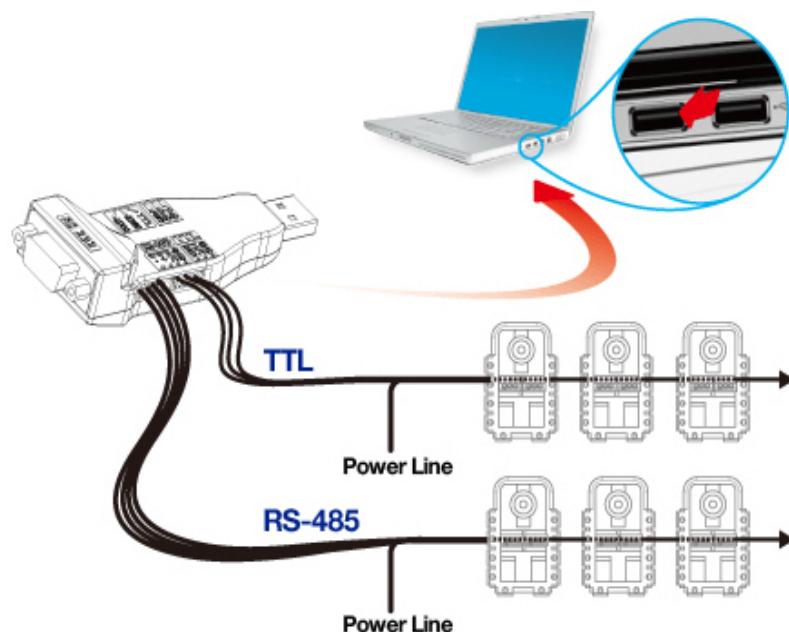


Figura 4.2: Dispositivo de comunicación USB a protocolo serial.

Los motores que componen esta gama comparten características, las cuales se mencionan a continuación:

MOTORES GAMA MX			
Voltaje de operación	14.8v	12v	11.1v
Protocolo	TTL Serial Asincrono		
Velocidad del puerto	8000bps - 3Mbps		
Retroalimentación de posición	SI		
Retroalimentación de temperatura	SI		
Control PID	SI		
Material	Carcasa plástica y reducción metálica		
Motor	Maxon RE-MAX		

Tabla 4.1: Características servomotores MX.

Los modelos de motores que componen esta gama difieren en características tales como las dimensiones, el par máximo a rotor bloqueado, la corriente máxima, o la velocidad máxima. A continuación se enlistan las características más sobresalientes para cada modelo de motor.

4.1.2. Características MX-106

MX-106			
Voltaje de operación	14.8v	12v	11.1v
Par de bloqueo	102kg.cm	85.6kg.cm	81.5kg.cm
Velocidad sin carga	55rpm	45rpm	41rpm
Peso	153g		
Tamaño	40.2 x 65.1 x 46 mm		
Resolución	0.088 grado/valor de registro		
Relación de reducción	1/200		
Corriente máxima	5.2A @ 12V		

Tabla 4.2: Características dynamixel modelo MX-106.



Figura 4.3: Servomotor dynamixel modelo MX-106.

4.1.3. Características MX-64

MX-64			
Voltaje de operación	14.8v	12v	11.1v
Par de bloqueo	74kg.cm	61kg.cm	56kg.cm
Velocidad sin carga	78rpm	63rpm	58rpm
Peso	126g		
Tamaño	40.2 x 61.1 x 41 mm		
Resolución	0.088 grado/valor de registro		
Relación de reducción	1/200		
Corriente máxima	4.1A @ 12V		

Tabla 4.3: Características Dynamixel modelo MX-64



Figura 4.4: Servomotor dynamixel modelo MX-64.

4.1.4. Características MX-28

MX-28			
Voltaje de operación	14.8v	12v	11.1v
Par de bloqueo	31.6kg.cm	25.5kg.cm	23.4kg.cm
Velocidad sin carga	67rpm	55rpm	50rpm
Peso	72g		
Tamaño	35.6 x 50.6 x 35.5 mm		
Resolución	0.088 grado/valor de registro		
Relación de reducción	1/193		
Corriente máxima	1.4A @ 12V		

Tabla 4.4: Características Dynamixel modelo MX-64



Figura 4.5: Servomotor dynamixel modelo MX-64.

Por otro lado es importante conocer la estructura de transmisión de la información de un servomotor con el dispositivo controlador. Para ello los servomotores dynamixel cuentan con un protocolo de comunicación serial asincrono, el cual transtite una serie de datos en una trama, como se ilustra

en la figura].



El significado de cada byte que compone al paquete datos es el siguiente:

- **0xFF 0xFF** : Es la instrucción que marca el inicio del paquete.
- **ID** : Es el ID de cada servomotor particular en la cadena.
- **LENGTH** : Es el tamaño del paquete. El tamaño es calculado como el numero de parametros más dos (N+2).
- **INSTRUCTION** : Indica el tipo de instrucción que ejecutará el servomotor dynamixel.
 - PING
 - READ_DATA
 - WRITE_DATA
 - REG_WRITE
 - ACTION
 - RESET
 - SYN_WRITE
- **PARANETER 0...N** : Este parámetro se usa cuando la instrucción requiere datos auxiliares.
- **CHECK SUM** : Se usa para verificar si el paquete de datos se dañó durante la comunicación.

A continuación se anexa una tabla con las características más relevantes de los registros que posee cada uno de los revomotores dynamixel.

AREA	Dirección	Nombre	Descripción	Acceso
	3	ID	Identificador del motor	L/E
	4	Baud Rate	Velocidad transmisión datos dynamixel	L/E
	10	Drive mode	Configuraciones en modo dual	L/E
	14	Max Torque(L)	Byte bajo del registro Máx torque	L/E
	15	Max Torque(H)	Byte alto del registro Máx torque	L/E
	24	Torque Enable	On Off Torque	L/E
	26	D gain	Ganancia de control derivativa	L/E
	27	I gain	Ganancia de control integral	L/E
	28	P gain	Ganancia de control proporcional	L/E
	30	Goal position(L)	Byte bajo del registro para una posición deseada	L/E
	31	Goal position(H)	Byte alto del registro para una posición deseada	L/E
	32	Moving Speed(L)	Byte bajo del registro para una velocidad deseada	L/E
	33	Moving Speed(H)	Byte alto del registro para una velocidad deseada	L/E
	34	Torque Limit(L)	Byte bajo del registro para un par deseado	L/E
	35	Torque Limit(H)	Byte alto del registro para un par deseado	L/E
	36	Present position(L)	Byte bajo del registro de la posición presente	L
	37	Present position(H)	Byte alto del registro de la posición presente	L
	40	Present load(L) ⁵⁹	Byte bajo del registro de la carga presente	L
	41	Present load(H)	Byte alto del registro de la carga presente	L

Tabla 4.5: Tabla de registros para servomotores Dynamixel de la gama MX.

4.1.5. Características de conexión

Se ha mencionado con anterioridad que el brazo robótico con el cual se realizaron las pruebas correspondientes para este trabajo consta de 10 servomotores dynamixel de la gama MX y de diferentes modelos. Para facilitar la comunicación entre los diferentes modelos de servomotores se utilizó un método de conexión *daisy chain* en el cual permite una conexión en cadena entre servomotores, asignandole un ID a cada servomotor y realizando la comunicación a través de un solo puerto.

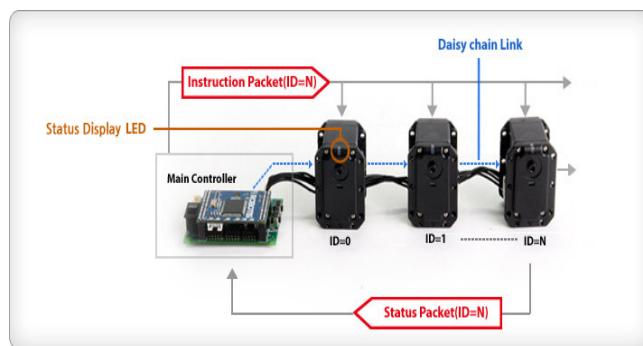


Figura 4.6: Servomotores dynamixel en conexión daisy chain.

El sistema *daisy chain* es un esquema de conexiones que forman una sucesión de enlaces, tal que el dispositivo A se encuentra conectado al dispositivo B y este, a su vez, se encuentra conectado a un dispositivo C y así sucesivamente. Es importante señalar que en este tipo de conexión los dispositivos no forman redes, en tal caso el dispositivo C no podría estar conectado al dispositivo A. Otro aspecto importante de resaltar es que en este tipo de conexiones al no poder formar redes la comunicación se realiza dispositivo a dispositivo, por tanto los dispositivos ultimos en la cadena pueden presentar retraso o fallas eléctricas con respecto de los dispositivos primeros en orden de la cadena.

4.2. Descripción de los elementos del sistema de manipulación

El sistema de Hardware del brazo robótico está compuesto por un total de 10 servomotores Dynamixel fabricados por la compañía Robotis [22]. Esta compañía cuenta con diversas gamas de modelos de servomotores según las necesidades de la aplicación. A continuación se describirá el sistema en orden descendente.

En la parte superior del brazo robótico se encuentran dos servomotores Dynamixel MX-106 conectados como maestro-esclavo, configurados en este modo trabajan de manera conjunta aumentando el par unitario de cada uno de los servomotores. Dadas las características antes descritas en la tabla 4.2 podemos observar que la configuración de servomotores entrega un par de torsión máximo a rotor bloqueado de $16,8\text{N.m}$ @ 12V. El sentido de giro positivo del arreglo de servomotores es el mostrado en la figura[4.8].

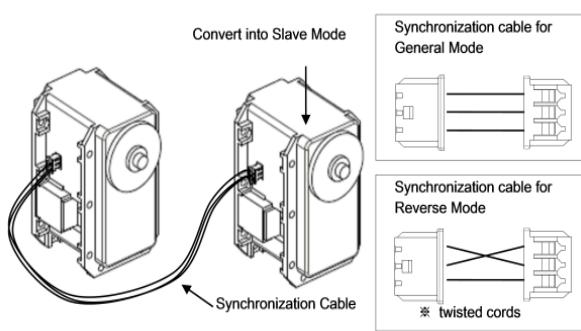


Figura 4.7: Configuración maestro-esclavo en servomotores dynamixel.

esclavo deben estar conectados mediante un cable de sincronización, como se muestra en la figura[4.7]. El servomotor esclavo es directamente controlado por la señal PWM del maestro transmitida a través del cable de sincronización. Es importante mencionar que la información de la posición,

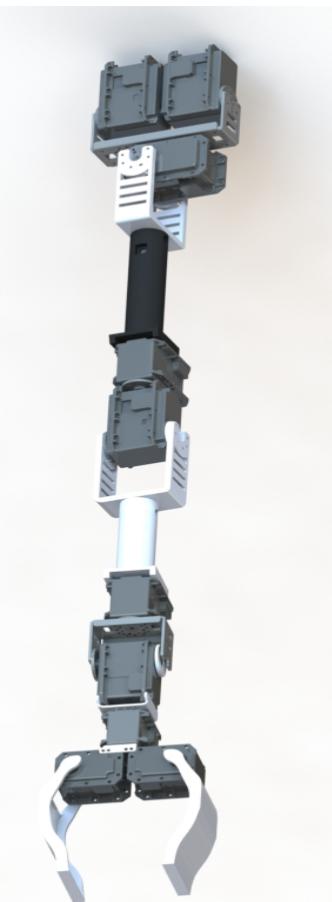
La configuración maestro-esclavo es un método de control simultáneo para dos servomotores Dynamixel, esta configuración es sumamente útil cuando se trata de construir una junta cuyo eje de acción es coincidente. Los motores respectivos maestro y

velocidad y corriente deseada es ignorada; puesto que esta información depende únicamente del maestro.

En la configuración maestro-esclavo el esclavo puede configurarse para adoptar un sentido de giro inverso en caso que el acoplamiento mecánico así lo requiera. Dentro de este modo el servomotor esclavo tendrá la misma velocidad que el motor maestro, solo diferenciado por el sentido inverso de giro.

Posteriormente se encuentra un servomotor modelo MX-106, ubicado en una disposición horizontal. Unido a este servomotor se encuentra un eslabón obtenido mediante técnicas de manufactura aditiva. Dado que la construcción del brazo robótico esta pensada desde el punto de vista antropomórfico este conjunto de servomotores, el maestro-esclavo y el servomotor MX-106 describen los grados de libertad que emulan el movimiento de un hombro humano.

El	eslabón	numero
1	obtenido	mediante
técnicas	de	manufactura
aditiva	funciona	como
elemento	de	unión
entre	servomotores.	Este
elemento	de	unión
cuenta	con	peso
total	de ****	Al final
de	este elemnto	de
unión	se	encuentra
un	servomotor	MX-64
cuyo	eje	acción es
	de	respecto
	perpendicular	
a	la	el brazo.
Directamente		acoplado



a este servomotor se encuentra otro servomotor modelo MX-106. Estos dos servomotores realizan el símil con un codo humano.

Continuando en orden descendente, se encuentra un segundo eslabón utilizado como elemento de unión. En el extremo de este elemento se encuentra un servomotor MX-106, posteriormente un MX-64 y por último un servomotor modelo MX-28. Estos tres elementos construyen un sistema similar al de la muñeca de un brazo humano.

Por último, se encuentra el efecto final compuesto de dos actuadores MX-28 ubicados en disposición horizontal. En el eje de acción de cada uno de estos se encuentra una pieza obtenida mediante impresión 3D que funge como sujetador para manipular objetos.

Como podemos observar el brazo robótico consta de un total de 10 servomotores conectados en *daisy chain*.

4.3. Cinemática directa

El problema de cinemática directa consiste en conocer la posición (x , y , z) del efecto final dada una determinada configuración de ángulos para el conjunto de actuadores que forman el sistema mecánico. Para ello se describe la posición del efecto final en términos de las transformaciones existentes entre este y la base fija del manipulador.

4.3.1. Teoría trasformaciones y medidas del brazo robotico

Se partió del sistema mecánico previamente construido del brazo robótico del robot de servicio Justina. Para ello se realizaron mediciones de distancias entre los respectivos ejes de acción de cada uno de los actuadores a fin describir los desplazamientos de los sistemas de referencia en el brazo robótico.

Es importante mencionar que para la descripción de las transformaciones en sistema ROS, podemos construir la matriz de rotación de tal manera que incluyamos las rotaciones y desplazamientos en los tres ejes coordenados. Esta característica nos proporciona una ventaja sobre las técnicas de descripción de cinemática directa convencionales, tal es el caso del Método Denavit-Hartenberg donde el sistema de transformaciones debe ser descrito utilizando, únicamente, dos rotaciones y dos translaciones según sus convenciones.

Es importante mencionar esta característica puesto que en algunos casos la conciencia Denavit-Hartenberg encuentra limitaciones para describir algunas transformaciones arbitrarias. En la representación Denavit-Hartenberg solo hay cuatro parámetros. Pues, mientras que el sistema de referencia i esté rígidamente unido al enlace i, tenemos la libertad para elegir el origen y los ejes de coordenadas del sistema de referencia i+1.

Claramente, no es posible representar una transformación homogénea arbitraria usando solo cuatro parámetros. Por lo tanto, comenzamos por determinar qué transformaciones homogéneas se pueden expresar en la forma D_H.

Supongamos que tenemos dos marcos, indicados por los cuadros 0 y 1, respectivamente. Entonces existe una única matriz de transformación homogénea A que toma las coordenadas del sistema de referencia 1 y las expresa en términos del sistema de referencia 0. Ahora, es necesario aclarar que los sistemas de referencia deben tener dos características adicionales:

- (DH1): El eje x1 es perpendicular al eje z0
- (DH2): El eje x1 intersecta el eje z0 [19]

$$T_n^{n-1} = T_{Z_{n-1}}(d_n) * R_z(\theta_n) * T_{x_n}(a_n) * R_{x_n}(\alpha) \quad (4.1)$$

$$T_n^{n-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \cos \alpha_n & \sin \theta_n \sin \alpha_n & a_n \cos \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \cos \alpha_n & -\cos \theta_n \sin \alpha_n & a_n \sin \theta_n \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Como podemos observar, en la convención de transformaciones Denavit-Hartemberg únicamente requerimos determinar el valor de cuatro variables, dos rotaciones (α, θ) y dos translaciones (a, d).

El sistema de descripción de transformaciones desarrollado por ROS, presenta la ventaja que nos permite describir la trasformación de una manera más detallada. Sin embargo la solución implementada no siempre

suele ser la más óptima, encuanto al manejo de la información por ser una mayor cantidad de datos.

Para ello se parte de la matriz de rotación compuesta roll, pitch, yaw.

$$R_1^0 = R_{z,\phi} * R_{y,\theta} * R_{x,\psi} \quad (4.3)$$

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & -\sin \phi \cos \psi - \cos \phi \sin \theta \sin \psi & \sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \cos \psi \\ \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & -\cos \phi \sin \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \psi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \psi & \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

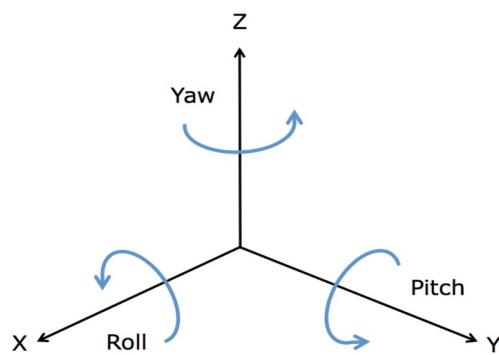


Figura 4.9: Rotaciones roll, pitch, yaw.

4.3.2. Implementación (Descripción con ROS)

Se utilizó un visualizador en 3D para observar el modelo del brazo y verificar el correcto movimiento mecánico del brazo. En tal caso se hizo uso de los paquetes proporcionados por *ROS* para la elaboración de modelos de robots. La descripción del modelo del robot se realizó en una estructura en formato XML. Esta descripción permite describir las transformaciones existentes entre cada uno de los frames significativos en el robot, así como permite cargar algún modelo *CAD (Computer Assisted Design)* de las piezas que componen al robot.

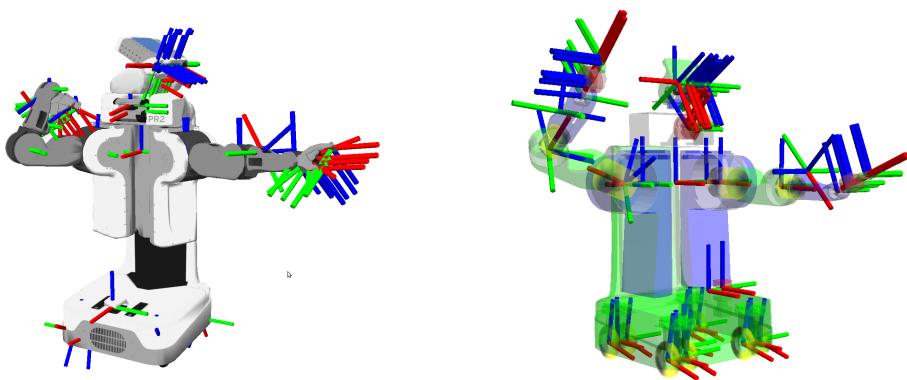


Figura 4.10: Ejemplo de un modelo de robot y sus respectivas transformaciones.

ROS proporciona una biblioteca de software únicamente dedicada al manejo de información de las transformaciones de un robot, la biblioteca de software lleva el nombre de *tf*. En un nivel práctico, un árbol de transformación define los desplazamientos en términos de translación y rotación entre diferentes marcos de coordenadas. La biblioteca *tf* usa una estructura en árbol para garantizar que solo haya un recorrido único que vincule dos sistemas coordinados entre sí y asume que todas las transformaciones del árbol se dirigen desde los nodos primarios a secundarios.

Para describir una transformación se requiere definir primero un conector, que funcione como cada uno de los elementos físicos, posteriormente la transformación se encargará de relacionar cada uno de estos conectores. Conceptualmente, cada nodo en el árbol de transformación corresponde a un sistema de coordenadas el cual representa cada uno de los conectores; por otra parte cada enlace de conexión corresponde a la transformación que debe aplicarse para pasar del nodo actual a su hijo.

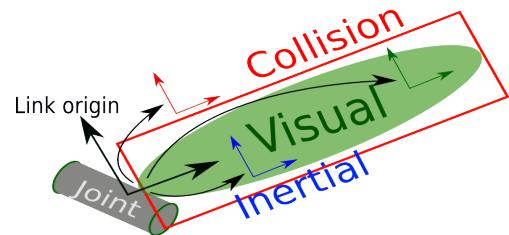


Figura 4.11: Constitución básica de *link* en el sistema ROS.

Para crear el árbol de transformaciones del manipulador de 7DOF, comenzamos por crear un sistema de referencia en la base del brazo, el cual servirá como sistema de referencia fijo, lo llamamos *base_ra_arm*. Posteriormente se fueron agregando eslabones según la configuración real del brazo. Para llegar a la configuración se partió de la siguiente restricción: el eje Z debe coincidir con el eje de giro del actuador, en posición y en sentido positivo, como se muestra en la figura.

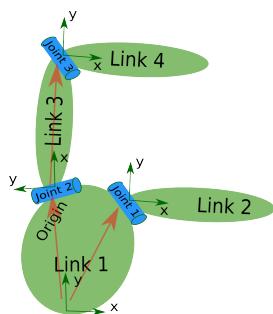


Figura 4.12: Ejemplo de sistema de transformaciones (sistemas de referencia y links).

Para crear esta configuración entre los diferentes sistemas de referencia, primero debemos decidir qué nodo será el padre y cuál será el hijo. Esta

distinción es importante porque asume que todas las transformaciones se mueven de padres a hijos. Elegimos el sistema de referencia *base_ra_arm* como principal, ya que a medida que se agregan otras piezas: motores, eslabones y conectores, tendrá más sentido que se relacionen con un sistema fijo. Esto significa que la transformada asociada con el efecto final y el sistema *base_ra_arm* puede ser obtenida mediante el árbol de transformaciones configurado. La conversión de la posición del sistema de referencia ubicado en el efecto final al sistema de referencia fijo ubicado en la base del brazo puede ser obtenida mediante una llamada a la biblioteca tf.

4.3.3. Comparación cinemática directa Denavit-Hartemberg y descripción completa de transformaciones

Se implementaron dos metodologías de descripciones para el cálculo de la cinemática directa del brazo robótico. La primera de ellas consistió en realizar la descripción completa de las transformaciones utilizando la información de rotación y translación de cada uno de los respectivos sistemas de referencia.

En este proceso y con la información previamente obtenida de las dimensiones del brazo robótico se construyó la siguiente tabla donde se muestra la información de los desplazamientos y rotaciones de los respectivos sistemas de referencia.

	TRANSLACIÓN			ROTACIÓN		
	x	y	z	roll	pitch	yaw
1	0.065	0.00	0.000	$\pi/2$	0.000	0.000
2	0.215	0.00	0.000	0.000	$\pi/2$	0.000
3	0.000	0.00	0.060	$-\pi/2$	$-\pi/2$	0.000
4	0.190	0.00	0.000	$\pi/2$	0.000	$\pi/2$
5	0.000	0.00	0.036	$-\pi/2$	$-\pi/2$	0.000
6	0.095	0.00	0.000	$\pi/2$	0.000	$\pi/2$

Tabla 4.6: Tabla de parametros de transformaciones entre sistemas de referencia para el brazo robotico de 7DOF.

Con la información obtenida de las dimensiones del brazo robótico real pudimos realizar un modelo virtual del brazo utilizando un archivo en formato XML donde describimos las trasfomaciones entre los diferentes sistemas de referencia y los elemertos de conexión obtenidos de modelos CAD. El resultado se puede observar en la figura[4.13]

El formato de descrpción virtual de un modelo de robot en formato XML se compone de *links* y *joints*. Un link describe las características de un elemento de unión, estas pueden ser mecánicas, de material, de posición, etc. Un *joint* por otra parte describe la realción existente entre los orígenes de dos links, dicho de otro modo describe la transformación existente entre los sistemas de refencias (*orígenes*) de dos links.

```

1 <link name="base_ra_arm">
2   <visual>
3     <origin xyz="-0.01 0.0 0.0" rpy="1.5707 0.0 1.5707"/>
4     <geometry>
5       <mesh filename="package://knowledge/hardware/stl/brazo/mx106_2.stl"/>
6     </geometry>
7     <material name="black_gray"><color rgba="0.2 0.2 0.2 1"/></material>
8   </visual>
9 </link>
10
11 <link name="ra_link0">
12   <visual>
13     <origin xyz="0.0 0.0 0.005" rpy="0.0 -1.5707 0.0"/>
14     <geometry>
15       <mesh filename="package://knowledge/hardware/stl/brazo/mx106_s.stl"/>
16     </geometry>
17     <material name="gray_black"><color rgba="0.3 0.3 0.3 1"/></material>
18   </visual>
19 </link>
20
21 <link name="ra_link1">
22   <visual>
23     <origin xyz="0.0 0.0 0.0" rpy="1.5707 -1.5707 0.0"/>
24     <geometry>
25       <mesh filename="package://knowledge/hardware/stl/brazo/bone_1.stl"/>
26     </geometry>
27     <material name="ra_material"><color rgba="0.9 0.85 0.75 1"/></material>
28   </visual>
29 </link>
30
31 .
32 .
33 .
34 <joint name="ra_1_joint" type="revolute">
35   <origin xyz="0.0 0.0 0.0" rpy="0.0 0.0 0.0"/>
36   <parent link="base_ra_arm"/>
37   <child link="ra_link0"/>
38   <limit effort="0.0" lower="0.0" upper="0" velocity="0.0"/>
39   <axis xyz="0 0 1"/>
40 </joint>
41
42 <joint name="ra_2_joint" type="revolute">
43   <origin xyz="0.064 0.0 0.0" rpy="1.5707 0.0 0.0"/>
44   <parent link="ra_link0"/>
45   <child link="ra_link1"/>
46   <limit effort="0.0" lower="0.0" upper="0" velocity="0.0"/>
47   <axis xyz="0 0 1"/>
48 </joint>
49 .

```

Listing 4.1: Descripción parcial del sistema de manipulación

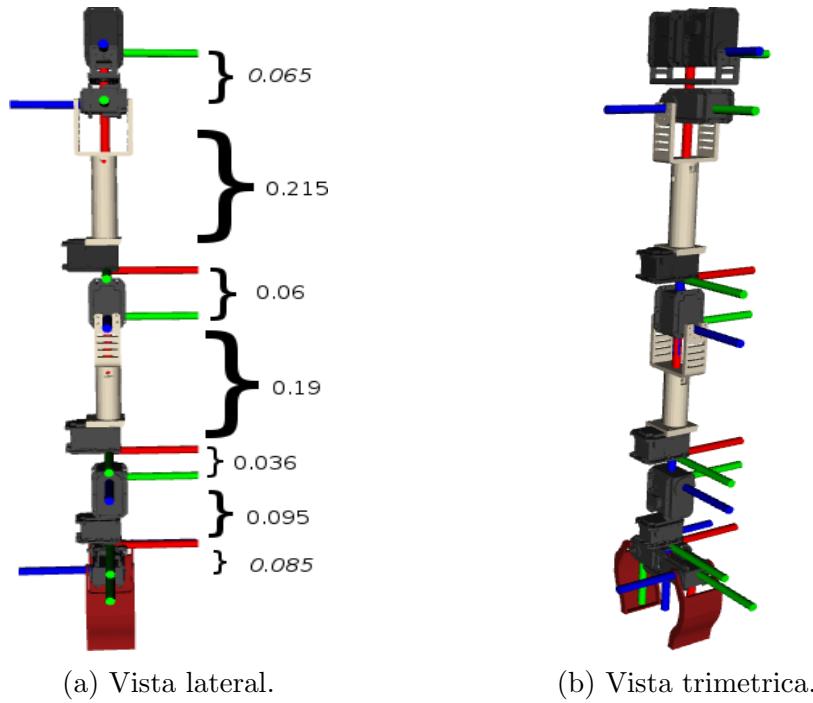


Figura 4.13: Modelo virtual del brazo robótico.

Por otro lado se realizó la descripción del sistema de manipulación utilizando la convención Denavit-Hartemberg. Para ello se comenzó por plantear los ejes z que deben ser coincidentes, en posición y en sentido de giro, con los ejes de acción de cada uno de los actuadores. Sin embargo, en este punto se observó una limitante en el método D-H, al intentar describir la trasformación entre el $link_2$ y el $link_3$ se observó que el método no puede describir con suficiente presición la rotación en el eje "x" y al mismo tiempo un desplamiento en el *eje y*. La manera de solucionar esta limitante consiste en realizar una transformación de rotación en el eje x primero, con esto los dos frames compartirán el mismo origen del sistema de referencia, posteriormente se plantea la translación, ahora en el *eje z*.

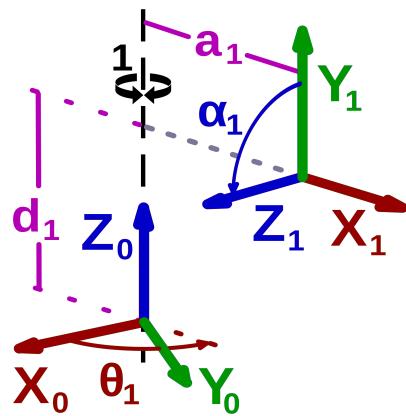
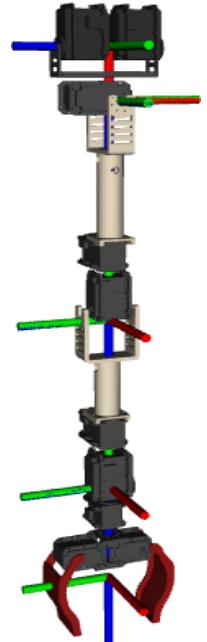


Figura 4.14: Ejemplo de obtención de parametros DH.

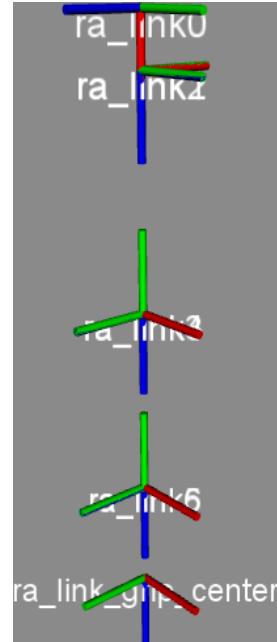
Por tanto, los parámetros que describen las transformaciones del brazo según la convencion D-H, se muestra en la siguiente tabla:

PARAMETROS DENAVITH-HARTEMBERG				
	D	A	α	θ
0-1	0.000	0.065	$\pi/2$	0.000
1-2	0.000	0.000	$\pi/2$	$\pi/2$
2-3	0.275	0.000	$-\pi/2$	$-\pi/2$
3-4	0.000	0.000	$\pi/2$	0.000
4-5	0.226	0.000	$-\pi/2$	0.000
5-6	0.000	0.000	$\pi/2$	0.000
6-7	0.165	0.000	0.000	0.000

Tabla 4.7: Tabla de parametros D-H para brazo robotico antropomórfico de 7DOF.



(a) Vista trimétrica.



(b) Vista de transformaciones.

Figura 4.15: Modelo virtual del brazo robótico utilizando la convección DH.

Como se puede observar en la Figura 4.14, la descripción de las transformaciones entre el *link1* y el *link2* comparten el origen. Unicamente difieren en la rotación del respectivo sistema de referencia. Sucede lo mismo para describir la transformación entre las parejas de *links*: [3 – 4] y [5 – 6].

De la comparación de estas dos representaciones podemos obtener pros y contras de cada una de ellas. Por un lado una representación completa de las trasformaciones nos da la posibilidad de realizar una descripción con mayor presición de cada una de las transformaciones. Esta característica permite alinear cada uno de los sistemas de referencia a el eje de acción de cada uno de los actuadores. En este sentido, es conveniente utilizar esta descripción puesto que simplifica la manera de publicar cada una de las transformaciones entre los sistemas de rerefencia, basta con estar leyendo la posición de cada uno de los actuadores y publicar dicho valor para obtener la representación grafica de la configuración del brazo en el modelo virtual.

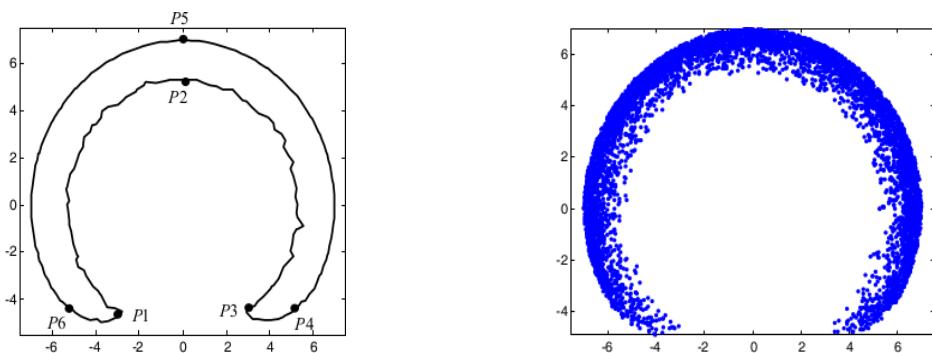
Por otro lado, estar escuchando en tiempo real una transformación compuesta de siete trasnformaciones completas requiere un mayor costo computacional comparado con realizar la multiplicación de las mismas siete matrices de transformación solo cuando sea de interés conocer la posición del efecto final. En tal caso resulta conveniente tener las dos descripciones: la descripción completa para el despliegue de información de manera visula en el ambiente virtual y la descripción D-H para conocer la posición del efecto final cuando sea necesario.

4.4. Determinación del área de trabajo

El espacio de trabajo es otro parámetro importante el cual servirá para optimizar las dimensiones del brazo robótico con el cual estamos trabajando. El análisis del espacio de trabajo de robots manipuladores es de gran interés, puesto que la geometría del espacio de trabajo puede considerarse no sólo un aspecto fundamental para el diseño del robot sino que también es esencial para la ubicación del robot en el entorno de trabajo y también para la planificación de trayectorias.

En robótica, el término espacio de trabajo, también denominado espacio de trabajo, puede ser entendido como: *El espacio de trabajo de un robot está definido como el grupo de puntos que pueden ser alcanzados por su efector-final. Cao et al. (2011).*

Dicho de otro modo, el espacio de trabajo de un robot es el espacio en el cual el mecanismo puede trabajar según sus propias restricciones mecánicas. A pesar de que esta definición está muy extendida, diversos autores también se refieren al espacio de trabajo como *volumen de trabajo*.



(a) Nube de puntos del espacio de trabajo en 2D.
(b) Curva de la frontera del espacio de trabajo del brazo robótico.

Figura 4.16: Vista en 2D del espacio de trabajo de un robot 3R.

La Figura 4.15 muestra el espacio de trabajo de un robot 3R, donde los

puntos de color azul representan el espacio de trabajo de este robot. Como se ha dicho previamente, los puntos en color azul representan cada una de las posiciones que puede alcanzar el efecto-final del robot 3R.

Principales características de un espacio de trabajo.

Cuando se pretende estudiar un espacio de trabajo, lo más importante es su forma y volumen (dimensiones y estructura). Ambos aspectos tienen una importancia significativa debido al impacto que éstos ejercen en el diseño del robot y también en su manipulabilidad. En el presente trabajo se dará una mayor importancia al estudio de las dimensiones del espacio de trabajo desde el punto de vista de la manipulabilidad.

En el caso del presente trabajo fue preciso conocer las características de forma, dimensiones y estructura del robot a analizar. Puesto que de estas características dependerá su espacio de trabajo.

- La forma es importante para la definición del entorno donde el robot trabajará.
- Las dimensiones son importantes para la determinación del alcance del efecto-final.
- La estructura del espacio de trabajo es importante para asegurar las características cinemáticas del robot las cuales están relacionadas con la interacción entre el robot y el entorno.

Además, la forma, dimensiones y estructura del espacio de trabajo dependen de las propiedades del robot en cuestión. Las dimensiones de los eslabones del robot y las limitaciones mecánicas de las articulaciones tienen una gran influencia en las dimensiones del espacio de trabajo. La forma depende de la estructura geométrica del robot y también de las propiedades de los grados de libertad. Por otro lado la estructura del espacio de trabajo viene definida por la estructura del robot y las dimensiones de sus eslabones.

Para la obtención del espacio de trabajo del brazo robótico en cuestión fue preciso partir de las características antes mencionadas. En este aspecto conocemos las tres características necesarias para la obtención del espacio de trabajo del robot, en cuanto a la forma podemos mencionar que el robot en cuestión es antropomórfico de 7 grados de libertad, cuyas dimensiones las hemos obtenido con anterioridad. En cuanto a la estructura podemos mencionar que conocemos el modelo de la cinemática directa del brazo e incluso que podemos visualizar en tiempo real la configuración del brazo antropomórfico, y por ende conocer la posición del efecto final. Solo hace falta conocer las restricciones mecánicas del brazo robótico, por tanto se incluye la tabla 4.8 .

RESTRICCIONES MECÁNICAS DEL BRAZO ROBÓTICO		
	θ_1	[1,47, -1,47]
	θ_2	[1,25, -0,21]
	θ_3	[1,5707, -1,5707]
	θ_4	[2,15, -1,15]
	θ_5	[1,5707, -1,5707]
	θ_6	[1,5, -1,35]
	θ_7	[1,5707, -15707]

Tabla 4.8: Tabla de restricciones mecánicas para brazo robótico antropomórfico de 7DOF.

Dentro de las metodologías planteadas para la obtención del espacio de trabajo de un robot existen diversas vertientes, una de ellas menciona la posibilidad de obtener dicho espacio generando números aleatorios con una distribución normal acotando los valores aleatorios dentro de las restricciones mecánicas. Posteriormente con los valores aleatorios de ángulos y el modelo de la cinemática directa del brazo robótico obtener la posición del efecto final e ir graficando cada uno de estos valores en el tiempo.

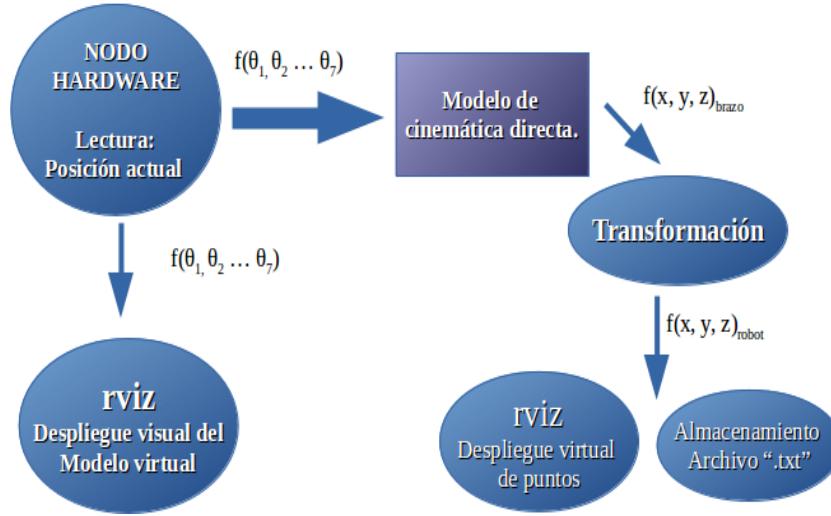
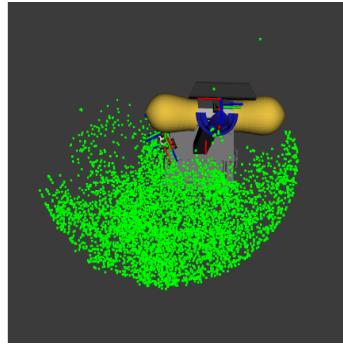
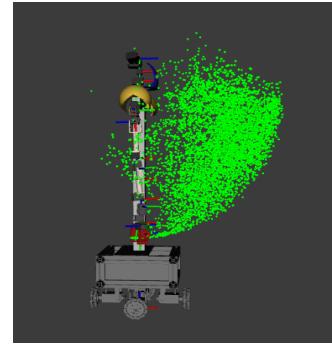


Figura 4.17: Esquema de construcción del espacio de trabajo para un robot de 7DOF.

Sin embargo, para el desarrollo de este documento se trabajó tanto con el modelo físico del brazo robótico en cuestión, así como con el modelo virtual del mismo. Dadas estas condiciones se planteó el desarrollo de la siguiente manera: con el modelo físico del brazo se obtuvieron en tiempo real las lecturas de posición de cada uno de los actuadores, posteriormente se actualizaba el modelo virtual del mismo. Con esta información previa, los valores de posición de cada uno de los actuadores y el modelo de la cinemática directa del brazo, se calculaba en tiempo real la posición del efecto final. Dicho de otra manera se realizó una construcción en tiempo real del espacio de trabajo del robot.



(a) Vista superior.



(b) Vista lateral.

Figura 4.18: Nube de puntos del espacio de trabajo de un robot antropomórfico de 7DOF.

La ventaja que esta técnica supone, sobre otras, es la capacidad de obtener el espacio de trabajo tomando en cuenta la restricciones reales del robot, así como observar las trayectorías y los puntos críticos del efecto final. En este sentido es importante mencionar que para algunos casos el efecto final podría alcanzar un punto dentro del área de trabajo; sin embargo dada alguna configuración del brazo esta podría suponer un esfuerzo indeseado en alguno de los actuadores. Con esta técnica se pudo evitar ese tipo de configuraciones, y construir el espacio de trabajo bajo estos supuestos.

Se obtuvo la nube de puntos que en forma se puede aproximar a la sección de una esfera, como se observa en la figura [4.18] . En el desarrollo de este trabajo se planteó la problemática de conocer si el brazo robótico es capáz de alcanzar un punto específico en el espacio, en tal caso los desarrollos en este punto deberían abordar la temática de la siguiente manera: encontrar la ecuación de un volumen que se aproxime a la forma que posee la nube de puntos con el objetivo de saber con certeza si el punto pertenece al volumen de trabajo del manipulador.

El problema de concocer aquellos puntos alcanzables para el brazo robótico, se abordó de la siguiente manera, se propuso una región en el espacio con forma prismatica. La región en el espacio mencionada con

anterioridad cumple la condición que sus vértices pertenecen a la nube de puntos del espacio de trabajo del robot, con esto se asegura que todos los puntos dentro de la región propuesta son alcanzables para el robot.

Sin perder de vista el objetivo final de este trabajo que es la correcta manipulación de objetos con cierta rotación en "z", este objetivo añade una limitante más: La región en el espacio propuesta debe contener puntos donde el efecto final pueda llegar con una orientación en z de por lo menos $\pi/2$ respecto sistema de referencia del robot: Para ello restamos a el valor máximo en el eje "x" del espacio de trabajo la cantidad 0,165[m] según los parametros DH. De esta manera se consiguió obtener un espacio de trabajo acotado cuyas características se observan en la figura [4.19] y en la tabla [4.9].

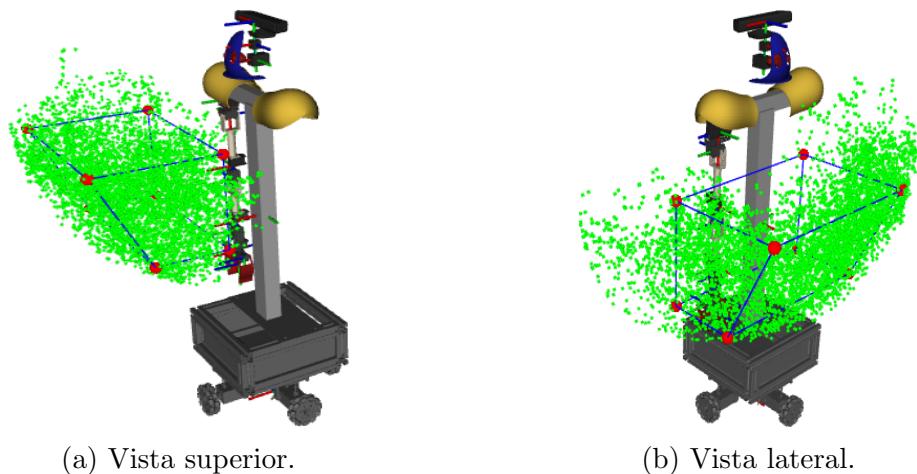


Figura 4.19: Espacio de trabajo acotado de un robot antropomórfico de 7DOF.

En la siguiente tabla podemos observar los parámetros que caracterizan el espacio de trabajo acotado para el brazo robótico de 7DOF.

PARAMÉTROS DEL ESPACIO DE TRABAJO DEL BRAZO ROBÓTICO		
VERTICES		
	P_1	[0,165837, 0,064973, 0,719878]
	P_2	[0,165837, -0,57737, 0,719878]
	P_3	[0,426291, -0,57737, 0,719878]
	P_4	[0,426291, 0,064973, 0,719878]
	P_5	[0,606291, 0,064973, 1,09449]
	P_6	[0,165837, 0,064973, 1,09449]
	P_7	[0,165837, -0,57737, 1,09449]
	P_8	[0,165837, -0,57737, 1,09449]
VOLUMEN		
	$V[m^3]$	0.0838517

Tabla 4.9: Tabla de características del espacio de trabajo para brazo robótico antropomórfico de 7DOF.

4.5. Cinemática inversa Método Geométrico

El problema de la cinemática inversa consiste en dada una posición deseada $p(x, y, z, roll, pitch, yaw)$ encontrar el valor de cada una de las juntas cinemáticas que lleven al brazo a la posición deseada. Este problema suele ser uno de los más interesantes y complejos, dentro del estudio de la robótica. Es preciso mencionar que para llevar el efecto final a cualquier posición y orientación deseada se requiere por lo menos un brazo robótico de 6DOF. En el desarrollo de este trabajo se plantea la resolución de la cinemática para un brazo robótico de 7DOF, lo cual suele aumentar el grado de complejidad en la resolución del problema.

$$H = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

El problema de la cinemática inversa consiste en encontrar una o todas las soluciones:

$$T_n^0(q_1, q_2 \dots q_n) = H \quad (4.7)$$

Donde H representa la matriz de posición y orientación deseada del efecto final. Por tanto $q_1 \dots q_n$ son los valores de las respectivas juntas mecánicas. Representado de otra manera:

$$f(q_1, q_2 \dots q_n) = f(x, y, z, roll, pitch, yaw) \quad (4.8)$$

Para abordar la resolución de dicho problema se hizo uso del concepto de *desacople cinemático*. Utilizando este concepto se puede simplificar el problema del cálculo completo de la cinemática inversa. Por medio del desacople cinemático se pueden considerar de manera independiente el cálculo de la orientación inversa y el cálculo de la posición inversa.

4.5.1. Desacople cinemático

Como se ha mencionado con anterioridad el problema de la cinemática inversa puede resolverse por separado en la resolución de la orientación inversa y la posición inversa, para manipuladores de 6 DOF o más. Es importante mencionar que para utilizar esta metodología de resolución el manipulador debe poseer la configuración de *muñeca esférica*. Es necesario partir de esta premisa puesto que la configuración de muñeca esférica implica que los tres últimos ejes de acción de intersectan en un punto llamado O_c . Además estos tres últimos ejes de acción pueden determinar la orientación del efecto final sin que dependan del valor de las juntas cinemáticas anteriores.

$$R_7^0(q_1, \dots, q_7) = R \quad (4.9)$$

$$o_7^0(q_1, \dots, q_7) = o \quad (4.10)$$

La suposición de una *muñeca esférica* implica que los ejes z_4 , z_5 y z_6 se intersectan en o_c . Como se observa en la figura [4.20] el origen del sistema O_5 coincide con el centro de la muñeca esférica O_c . Es importante resaltar que el movimiento de los tres últimos ejes no afecta la posición del centro de la muñeca O_c .

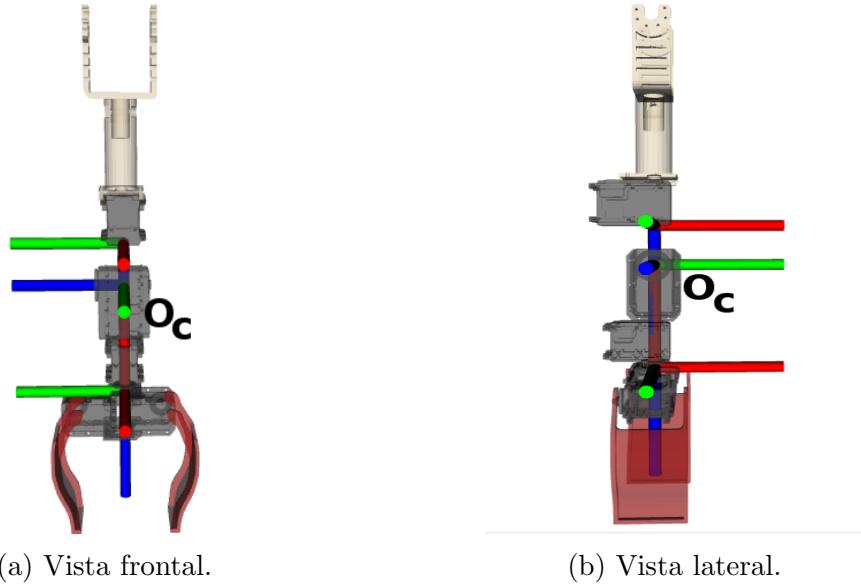


Figura 4.20: Centro de rotación de una muñeca esférica.

El centro del efecto final deseado podemos llamarlo o y se puede obtener como la traslación d_6 a lo largo del eje x a partir del punto o_c^0 .

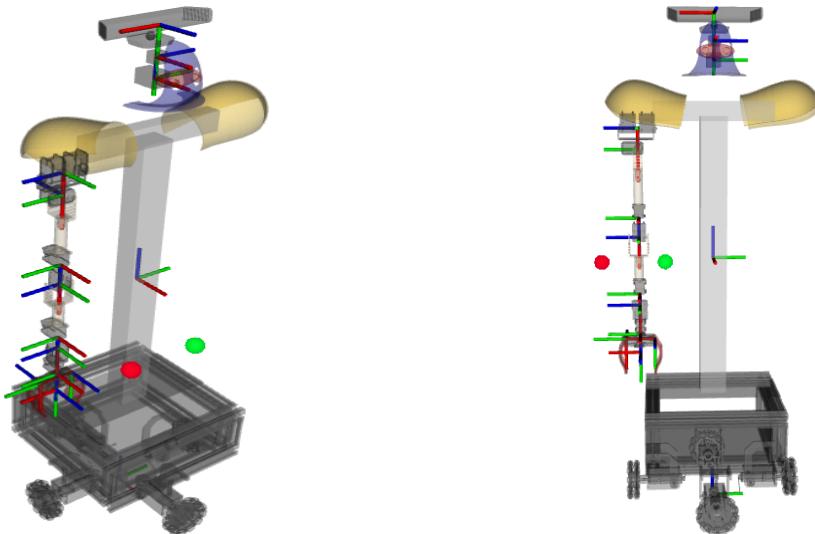
$$o = o_c^0 + d_6 R \hat{x} \quad (4.11)$$

$$o_c^0 = o - d_6 R \hat{x} \quad (4.12)$$

$$\begin{bmatrix} x_{oc} \\ y_{oc} \\ z_{oc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{EE} - d_6 r_{13} \\ y_{EE} - d_6 r_{23} \\ z_{EE} - d_6 r_{33} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

De la ecuación 4.13 podemos observar que para realizar el cálculo del punto que representa el centro de la muñeca del manipulador solo debemos conocer el punto objetivo del efecto final P_{EE} y la orientación deseada R . Utilizando la ecuación 4.13 calculamos el centro de la muñeca (*punto en rojo*). Posteriormente este punto servirá para calcular la cinemática

inversa del manipulador quedando únicamente 4 valores de articulaciones por calcular.



(a) Posición deseada del efecto final. (verde) (b) Posición del centro de la muñeca. (rojo)

Figura 4.21: Centro de la muñeca con rotación $\pi/2$.

4.6. Cinemática inversa paquetería MoveIt

La paquetería de software *moveIt* consiste en una serie de librerías enfocadas a las tareas de manipulación de objetos en la robótica. Los paquetes *arm_navigation* fueron diseñados con el objetivo específico de ayudar en tareas de planeación de movimientos, generación de trayectorias y monitoreo del ambiente particularmente para los manipuladores del robot PR2.[23] La idea original al desarrollar la librería moveIt era generar planes de manipulación y trayectorias basándose información de un modelo del entorno. Dichos modelos del entorno se crean, comúnmente, utilizando la fusión de datos del sensor láser y de sensores estéreo colocados en los robots.

El ambiente era representado como una mezcla de dos formatos:

1. Una red voxelizada que representaba la mayor parte de los obstáculos en el medio ambiente.
2. Primitivas geométricas y modelos de mallas para representar objetos que habían sido reconocidos y registrado en el medio ambiente mediante rutinas de detección de objetos.

De esta manera la información del modelo del entorno sirve de entrada principal a los planificadores que constituyen la paquetería *moveIt*.

MoveIt! incorpora herramientas para planeación de movimientos, cinemática, percepción 3D, control y navegación. Además provee una plataforma de uso fácil para desarrollo de aplicaciones robóticas avanzadas, permitiendo la evaluación de nuevos diseños de robots y la construcción de productos robóticos para su uso industrial, comercial y de investigación, entre otros. *MoveIt!* Es el software de código abierto más usado para manipulación de robots.

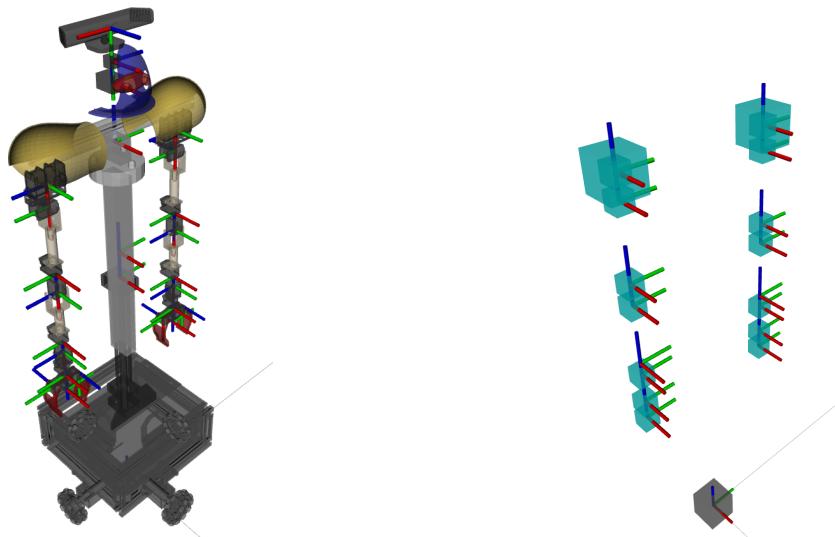
En la actualidad *moveIt* proveé una interfaz genérica para la planeación de movimiento de manipuladores que puede ser integrada muy fácilmente en

ROS. Esta interfaz permite la integración de diferentes tipos de planeadores de movimientos, por ejemplo:

1. Planeadores aleatorizados. Open Motion Planning Library (OMPL).
2. Planeadores basados en búsquedas. (SBPL)
3. Librerías de optimización de trayectorias. (CHOMP)
4. Librerías de optimización estocástica para la planeación de movimientos. (STOMP)

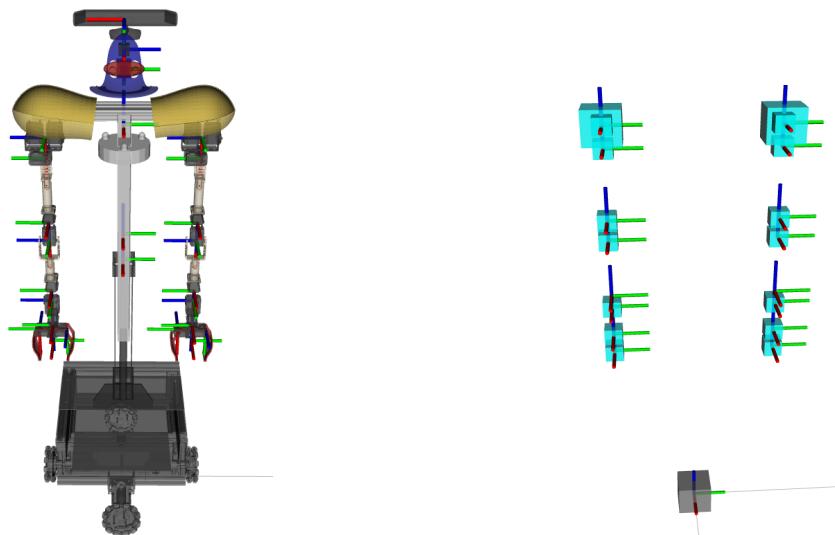
La paquetería *moveIt* permite personalizar el solucionador de cinemáticas para realizar cálculos más rápidos de la cinemática inversa. Utilizando para ello métodos numéricos. Una característica importante de la paquetería *moveIt* es que para solucionar la cinemática inversa extrae de la información necesaria desde un archivo URDF (archivo estándar para descripción de robots en el formato aceptado por ROS).

De esta manera se utilizó el archivo URDF que contiene la información con la descripción de las transformaciones entre los elementos del robot Justina. Para ello se creó un archivo extra que contiene únicamente la información de translaciones entre los elementos que constituyen los brazos del robot Justina. Como se muestra en la figura 4.22.



(a) URDF descripción del robot Justina. (b) URDF descripción de las transformaciones de los brazos del robot Justina.

Figura 4.22: Vista trimétrica del despliegue del robot Justina y sus respectivos manipuladores en el visualizador gráfico Rviz.



(a) URDF descripción del robot Justina. (b) URDF descripción de las transformaciones de los brazos del robot Justina.

Figura 4.23: Imagen de la comparación entre descripciones de los brazos del robot Justina.

Con la información del archivo URDF se creó un nuevo archivo que

contiene la información de las relaciones entre los elementos que constituyen al robot Justina, tal documento es conocido como SURDF, por ser una descripción semántica del robot.

Una vez que se generaron tales archivos se procedió a crear un modelo cinemático de los brazos del robot Justina. Tal modelo cinemático de los brazos nos da acceso a funciones para obtener la cinemática inversa, utilizando el solucionador de cinemática KLD integrado en la paquetería *moveIt!*.

Esta sección en particular tiene como objetivo comparar los ambos métodos de solución de la cinemática inversa del robot de servicio Justina. Por tanto en el presente trabajo se analiza y compara el tiempo de ejecución de ambos algoritmos. Y como característica extra se plantea una función de utilidad para evaluar la *conveniencia* de utilizar un algoritmo u otro.

**** Imagen de la estructura de la paquetería *moveIt!*.

4.7. Planteamiento de la función de costo para el cálculo de la cinemática inversa.

Sabemos que al resolver el problema de la cinemática inversa podemos obtener múltiples soluciones para una misma información de entrada $x, y, z, roll, pitch, yaw$. Por ello es importante determinar en qué casos es conveniente tomar la información obtenida mediante un método geométrico o mediante un método iterativo. Por tal razón en el presente trabajo de tesis se plantea una función de costo que nos permita comparar y cuantificar ambos algoritmos de solución de cinemáticas.

Para el planteamiento de la función de costo se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- Los valores de ángulos más alejados de cero implican un mayor gasto energético de los motores.
- Los ángulos de los motores 0 y 5, deben ser negativos para obtener una configuración de codo abajo y conservar una estructura antropomórfica de los brazos.

$$\epsilon = f(\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)$$

$$\epsilon = \sum_{i=0}^n |\theta_i| * \alpha \quad (4.14)$$

Donde α representa una ganancia que establecimos con un valor de 0.5. Para corregir el problema con la morfología de la toma de objetos se optó por restringir los valores de ángulos dentro del archivo que contiene la descripción del robot. De esta manera se realizaron las pruebas llamando dos servicios para el cálculo de la cinemática inversa y evaluando la función de costo con la respuesta obtenida.

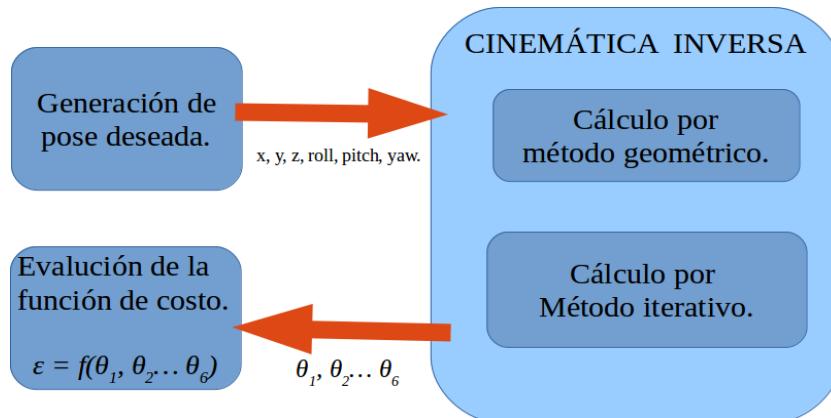


Figura 4.24: Imagen representativa de la comunicación entre módulos para evaluar la función de costo propuesta para el cálculo de la cinemática inversa.

Capítulo 5

Integración

5.1. Ros

ROS es un meta-sistema operativo de software libre para robótica que ofrece las utilidades que se esperarían en cualquier sistema operativo: abstracción de hardware, control de dispositivos de bajo nivel, implementación de funcionalidades comunes, intercambio de mensajes entre procesos y mantenimiento de paquetes. Su objetivo principal es dar soporte a la reutilización de código en la investigación y desarrollo de robótica [21].

Una de las principales ventajas que ofrece es la de comunicar distintos procesos dependientes o independientes entre sí de manera muy sencilla. El funcionamiento de un robot se piensa de manera modular, donde cada módulo realiza una tarea específica y ROS se encarga del transporte de la información entre ellos. Además, su creciente comunidad aporta mucho al desarrollo de nuevo software que otros usuarios pueden utilizar de acuerdo a sus necesidades.

5.1.1. Nodos

Nodo es el nombre que recibe en ROS los pequeños módulos que conforman la red de trabajo; se encargan de realizar un proceso en particular. Por ejemplo, un nodo mueve los motores, otro nodo es responsable de la interfaz con el usuario, otro planea las trayectorias, mientras que un último nodo controla los sensores. La comunicación entre nodos se realiza por medio de mensajes usando tópicos o servicios.

5.1.2. Paquetes

El software en ROS se organiza por medio de paquetes. Un paquete puede entenderse como una carpeta con estructura definida y puede contener el código de un nodo, la definición de mensajes, archivos de configuración, software ajeno a ROS, etc. Se pretende que un paquete ofrezca una utilidad por sí mismo, pero no debe ser tan complejo como para ser difícil de entender por otros usuarios. Cuando se comparten desarrollos en la comunidad de ROS, los paquetes son la unidad más pequeña de construir y publicar. Es decir, si se crea un nodo con una funcionalidad única y éste se quiere compartir con el mundo, lo que se debe compartir en realidad es el paquete que contiene al nodo.

5.1.3. Tópicos

Uno de los paradigmas para comunicar nodos entre sí es por medio de tópicos. Un nodo publica cierto tipo de información en un tópico específico y todos los nodos que requieran de esa información deberán suscribirse a ese tópico para obtenerla. En cuanto los datos sean publicados, los nodos suscritos la recibirán. El nodo publicador no sabe quién o quiénes leerán lo que publique, únicamente sabe a dónde mandar la información. Lo mismo sucede del otro lado, los nodos suscritos no saben quién publica la información, sólo saben de dónde la deben esperar. Cada tópico comunica

únicamente un tipo de mensaje definido.

5.1.4. Servicios

El otro paradigma para comunicar nodos son los servicios utilizando un sistema petición-respuesta. Si algún proceso o cálculo se requiere hacer sólo en ciertas situaciones es conveniente programarlo como un servicio. Si un nodo requiere utilizar un servicio, manda un mensaje de petición con la información necesaria al nodo que ofrece dicho servicio, el procesamiento se lleva a cabo y se regresa al nodo solicitante un mensaje de respuesta con el resultado del servicio. Al igual que los tópicos, cada servicio tiene el tipo de mensaje específico con el que se comunicará; hay un tipo de mensaje para las peticiones y otro para las respuestas.

***Esquemas de comunicación Topicos y Servicios.

5.2. Máquinas de estados

Una máquina de estados finita es un modelo matemático computacional, el cuál puede tener uno o un número finito de estados en un momento dado. Dicho modelo matemático se cumple la función de mostrar las transiciones entre diversos estados de un objeto o proceso. Las máquinas de estados proporcionan información muy importante de un proceso, dicha información se presenta en dos medios diferentes naturaleza. En primer lugar intenta describir un proceso en una cantidad finita de estados, los cuales deben ser suficientes para describir el proceso de manera suficiente. En segundo lugar determina los criterios de transición entre diferentes estados de objeto o proceso.

En este sentido, como parte de este trabajo, se plantean las máquinas de estados como la metodología de solución ante ciertas problemáticas como lo

son: *describir el proceso de la toma de objetos, describir el proceso de llevar el brazo hasta el punto óptimo de sujeción, describir el proceso de evaluación de la función de costo para el brazo manipulador del robot Justina, entre otras.*

5.2.1. Descripción de pruebas de toma de objetos.

La toma de objetos es la parte crucial de este trabajo, la importancia de este evento radica en que este evento se incluye la totalidad de tareas desarrolladas en este trabajo para realizar una prueba de mayor complejidad. A grandes rasgos, la prueba de la toma de objetos se compone de subtareas, algunas de las cuales se describen a continuación.

La primer subtarea es la segmentación del objeto y el cálculo del respectivo centroide del objeto en cuestión. Como entrada de la tarea se tiene una nube de puntos obtenida por la cámara RGB-D Kinect y lo esperado a la salida es una posición x , y , z en el espacio así mismo la orientación del objeto $roll$, $pith$, yaw . La primer subtarea a realizar, partiendo con la nube de puntos como entrada al sistema, es la segmentación de un plano (en caso de existir), posteriormente se eliminan los puntos pertenecientes al plano y por debajo de este, se eliminan los puntos más lejados 0,5[m] en el eje x respecto al robot. Se parte de las siguientes premisas: que el conjunto de puntos restante corresponde al conjunto de puntos que conforman al objeto, que solo se encuentra un objeto en la mesa en cada evento de toma de objetos. Con tal información, podemos proceder a calcular el centroide del objeto así como el rectivo ángulo del mismo.

***Esquemas de proceso de segmentación del objeto.

Para realizar el cálculo del centroide del objeto en cuestión se utiliza la ecuación [], la aplicación de dicha formula es prácticamente directa, no así el cálculo de los ángulos representativos de la orientación del objeto. Para

ello se calculan en un principio, los componentes principales del conjunto formado por los puntos del objeto, con la información de los eigenvectores de la matriz de covarianzas podemos obtener la dirección en la cual ocurre la mayor distribución de los puntos, y por tanto podemos obtener los cosenos directores de cada uno de los respectivos eigenvectores obteniendo así los ángulos de rotación *roll*, *pitch*, *yaw*.

***Esquemas de cálculo de la cinemática inversa.

Una vez conociendo esta información nos es posible avanzar a la etapa de manipulación para la cual es necesario conocer la información de la información del objeto en el espacio *x*, *y*, *z* y con ayuda del proceso anteriormente descrito podemos obtener los ángulos requeridos para el efecto final del manipulador. En esta parte y como parte de los resultados del análisis comparativo entre las soluciones encontradas mediante la paquetería *MoveIt!* y el método geométrico, se optó por utilizar el método geométrico ya implementado en el robot de servicio Justina.

***Esquemas de proceso toma de objetos.

Con el resultado del cálculo de la cinemática inversa, se obtienen los ángulos requeridos para cada uno de los actuadores para que el efecto final llegue al punto en el espacio deseado. Para ello se utiliza un *tópico* implementado en ROS, que comunica los ángulos deseados del manipulador con un nodo encargado de operar el hardware en este caso los motores Dynamixel.

5.2.2. Pruebas de toma de objetos estado actual.

En lo que respecta al proceso de la toma de objetos actual, en el robot de servicio Justina, únicamente se utiliza la información de posición del objeto sin considerar la información de orientación. Este proceso es susceptible a

fallas cuando se trata de objetos de grandes dimensiones, entiendase objetos con dimensiones mayores a la longitud total del efecto final del manipulador en su mayor apertura. Por otro lado, puede presentar fallas con objetos de alturas reducidas, estos son objetos con alturas menores a la mitad de la longitud d del manipulador pues ello indica una posible colisión con la superficie que soporta dicho objeto.

***Esquemas de ejemplificación de dimensiones excedidas y reducidas para objetos.

5.2.3. Pruebas de toma de objetos con información de orientación y dimensiones del objeto.

Como parte de los desarrollos obtenidos de este trabajo, se adiciona la información de la orientación de los objetos, con la cuál se realizaron pruebas que nos lleven a verificar si la adición de esta información mejora significativamente la tarea de toma de objetos en el robot de servicio Justina.

Para ello, una vez realizada la segmentación del objeto en cuestión se procede a calcular el centroide del objeto, posteriormente se calcula la matriz de covarianzas de y se obtienen los vectores y valores característicos de la matriz, con lo cuál obtenemos los ejes que representan una aproximación a la orientación del objeto.

***Imagen de cálculo de la orientación con componentes principales.

***Esquema de llamada a servicios, ROS.

5.3. Constitución del robot de servicio Justina

***Imagenes de Justina virtual y real.

5.3.1. Estructura de software del robot Justina.

***Imagenes de Justina virtual y real.

Capítulo 6

Resultados y conclusiones

La descripción de las pruebas y la discusión de resultados se abordará con la siguiente estructura. Se describirán pruebas que permitieron realizar una evaluación del desempeño de los algoritmos con respecto a los que actualmente están operando en el robot de servicio Justina.

Se describirá conforme al desarrollo de este trabajo.

1. Extracción de planos.
 - Exactitud, rapidez.
2. Extracción de objetos y sus características.
 - Exactitud en la estimación de la posición.
 - Comparación en característica de altura.
 - Estimación de la orientación de objetos.
 - Exactitud en el cálculo de la orientación. Comparación orientación estimada y real.
3. Espacio de trabajo del algoritmo numérico.
4. Prueba de tarea de manipulación con adición de la información de dimensiones.

5. Comparación tarea de manipulación utilizando información de orientación de los objetos.

6.1. Extracción de planos.

En esta sección analizaremos los resultados obtenidos al probar el algoritmo RANSAC para encontrar planos modificando el numero de iteraciones. Observaremos el comportamiento del error y el tiempo de ejecución a fin de encontrar el número óptimo de iteraciones para este algoritmo.

El proceso para el análisis de datos fue el siguiente: se propuso un modelo de plano conocido por el usuario. Dicho modelo se obtuvo a partir del conocimiento de la altura del plano en este caso una mesa. Posteriormente se cuantificó la cantidad de puntos que entraban en este modelo ideal y se tomó como base para la medición de errores. Continuando con el procedimiento se modificó el algoritmo para realizar un número determinado de iteraciones (600, 200, 100, 50, 30, 24 y 20) y se midió el error relativo y el tiempo de ejecución, en cada uno de estos procedimientos.

Para probar el algoritmo con 600 iteraciones se tomaron 50 muestras los resultados se pueden observar en la siguiente gráfica.

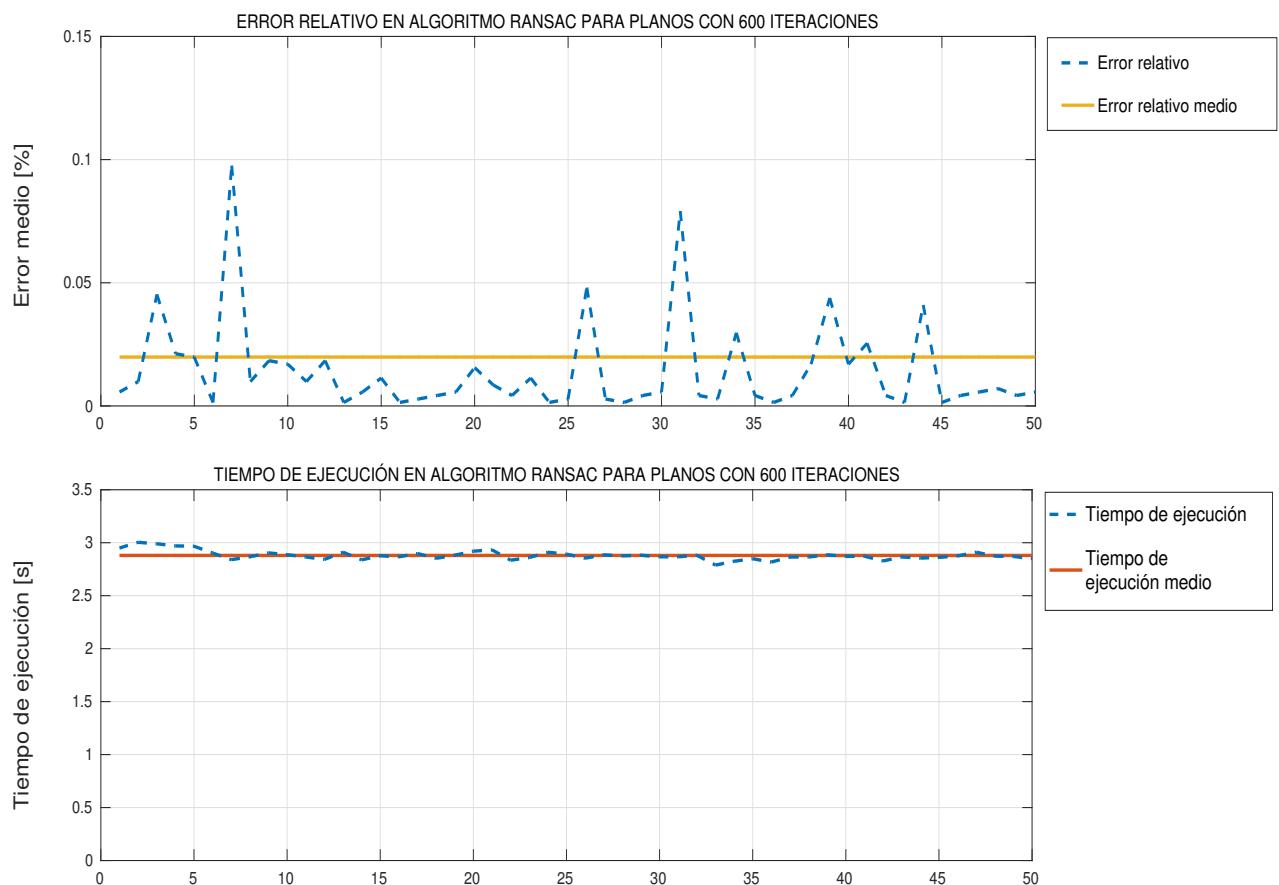


Figura 6.1: Gráfica correspondiente al error relativo para el algoritmo RANSAC para detección de planos con 600 iteraciones.

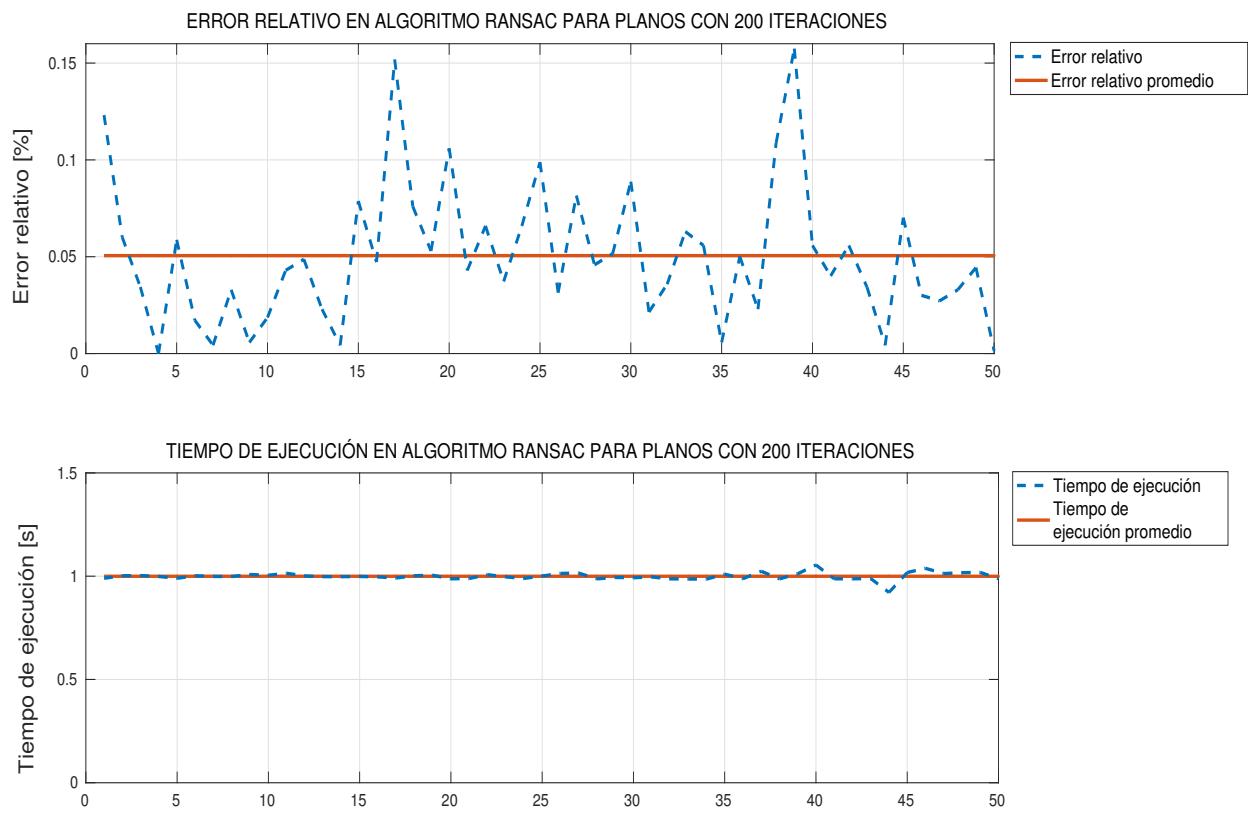


Figura 6.2: Gráficas correspondientes al error relativo y tiempo de ejecución para el algoritmo RANSAC con 200 iteraciones.

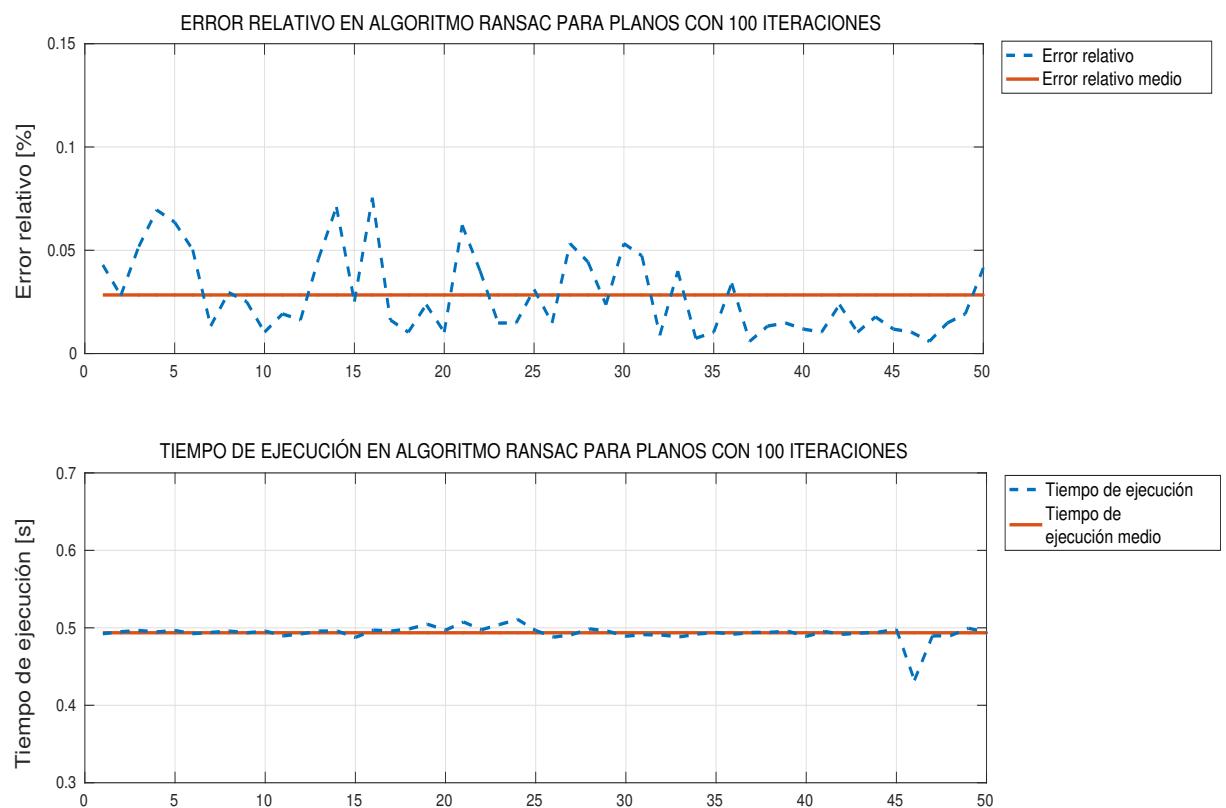


Figura 6.3: Gráficas correspondientes al error relativo y tiempo de ejecución para el algoritmo RANSAC con 100 iteraciones.

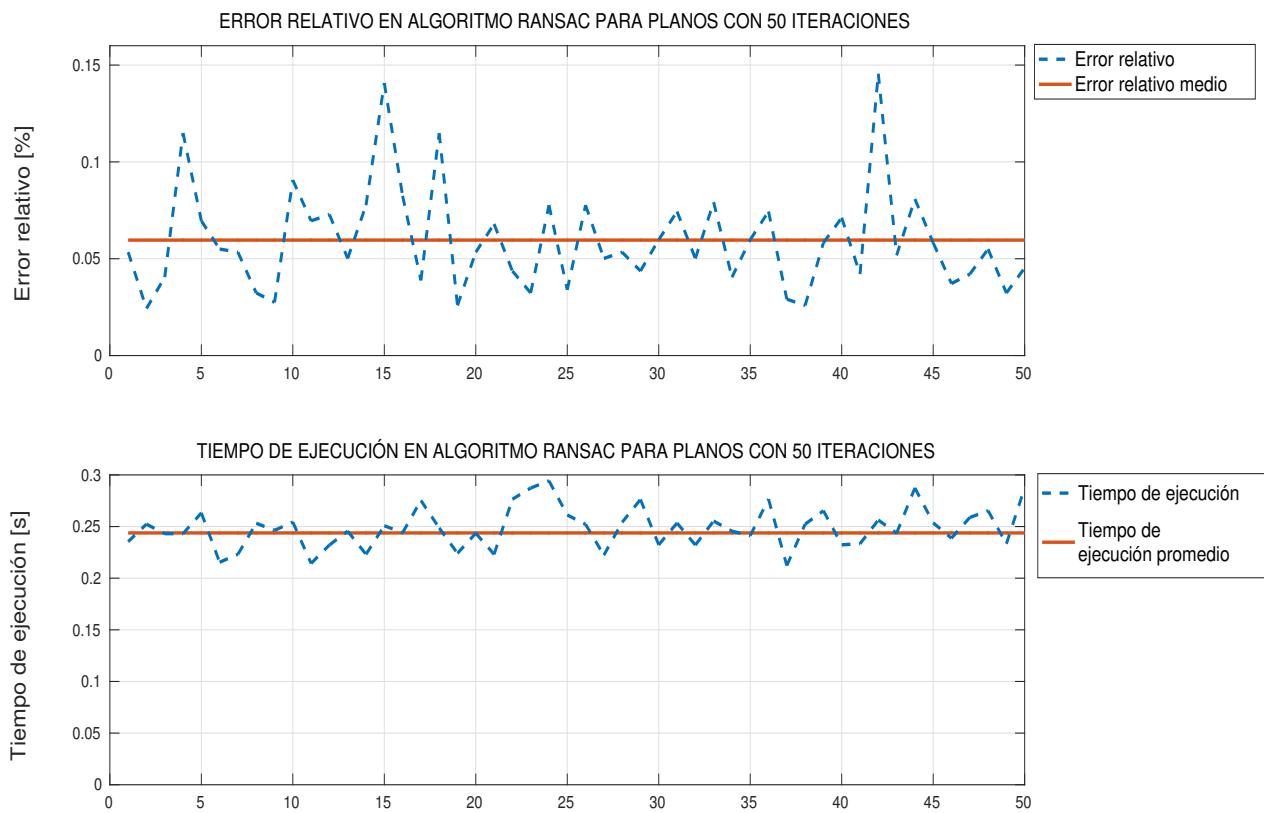


Figura 6.4: Gráficas correspondientes al error relativo y tiempo de ejecución para el algoritmo RANSAC con 50 iteraciones.

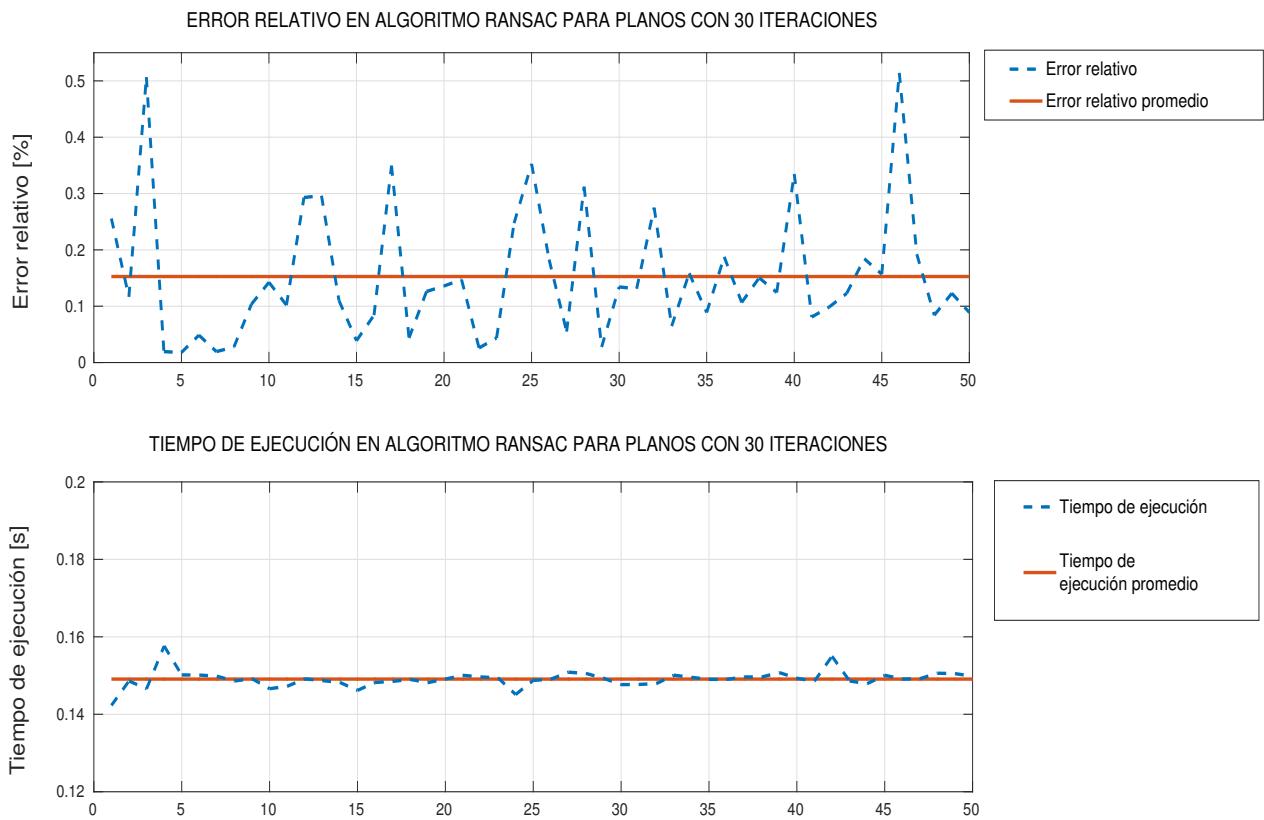


Figura 6.5: Gráficas correspondientes al error relativo y tiempo de ejecución para el algoritmo RANSAC con 30 iteraciones.

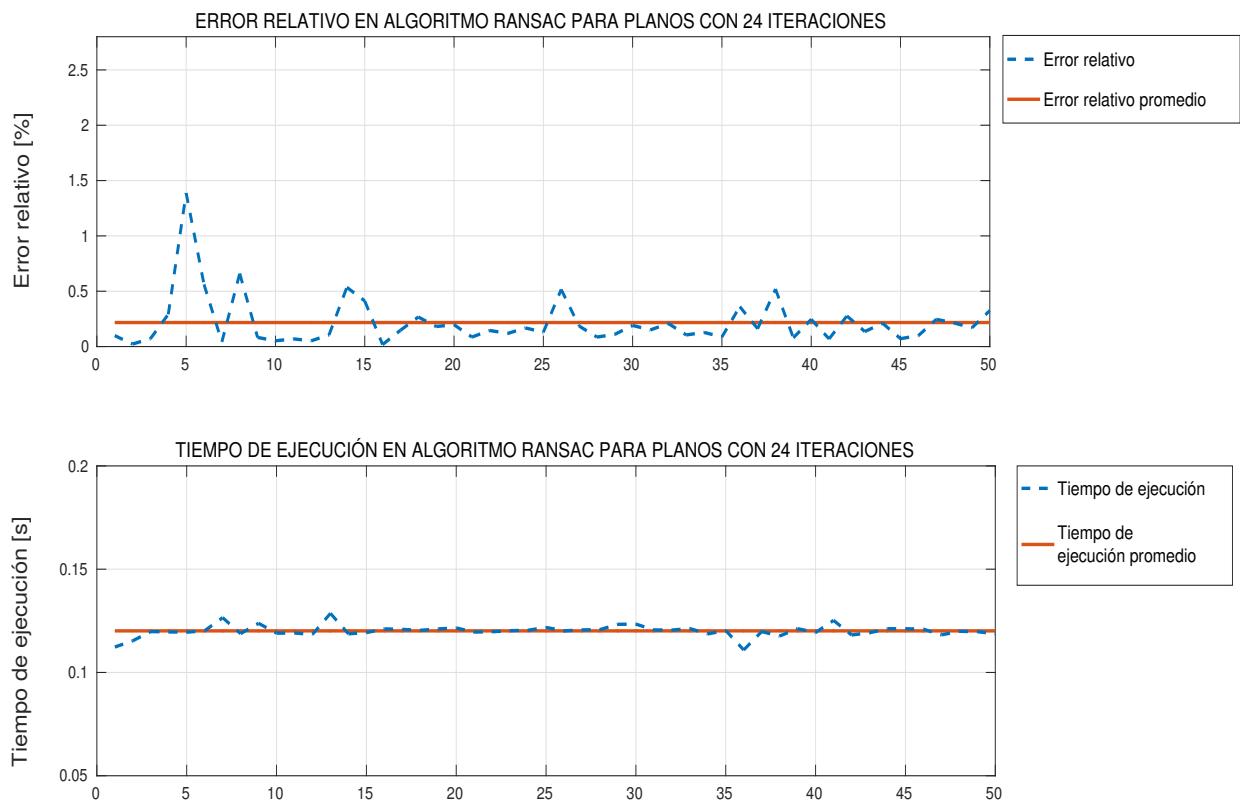


Figura 6.6: Gráficas correspondientes al error relativo y tiempo de ejecución para el algoritmo RANSAC con 24 iteraciones.

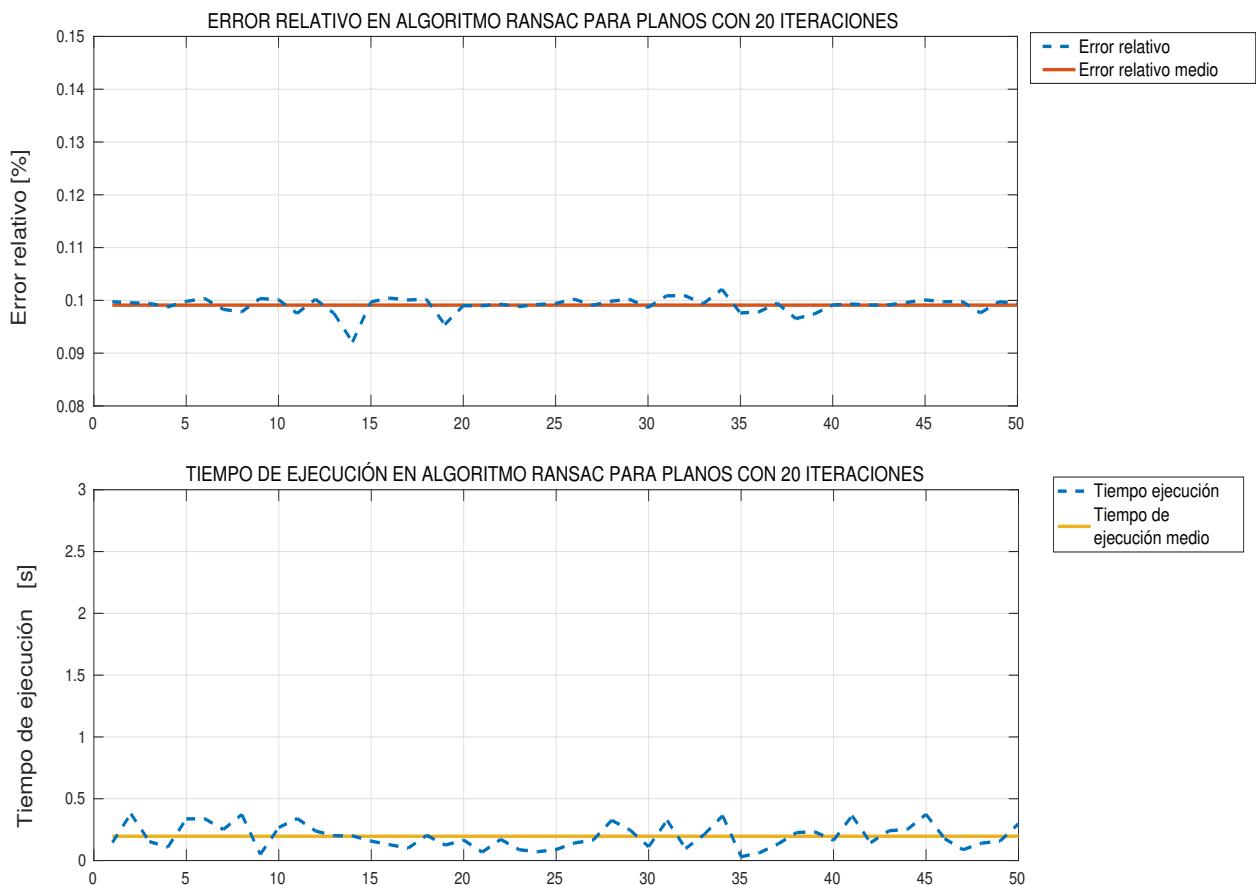


Figura 6.7: Gráficas correspondientes al error relativo y tiempo de ejecución para el algoritmo RANSAC con 20 iteraciones.

Una vez que se obtuvo la información parcial de cada uno de estos eventos se realizó una tabla extra que agrupa la información del tiempo de ejecución promedio y el error relativo promedio contra el número de iteraciones del algoritmo. Se obtuvo la siguiente gráfica.

TIEMPO DE EJECUCIÓN PROMEDIO VERSUS ERROR RELATIVO PROMEDIO

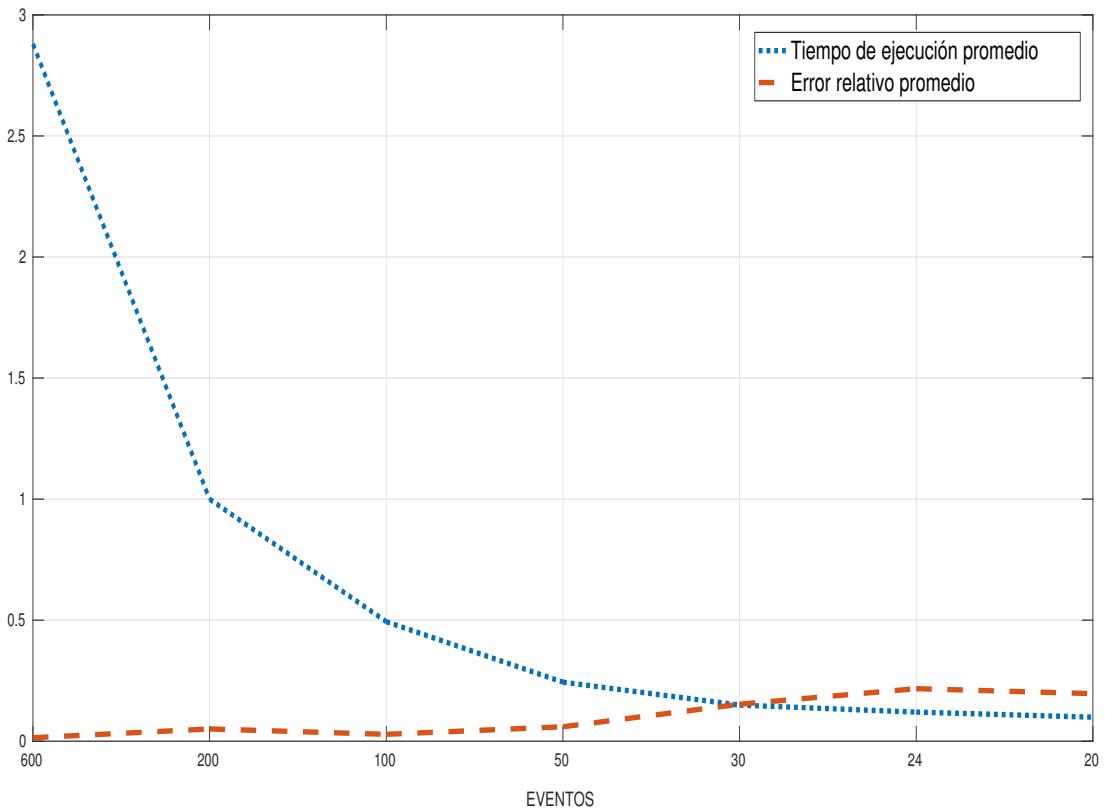


Figura 6.8: Gráfica error relativo versus tiempo de ejecución para diferentes números de iteraciones.

Como podemos observar en la tabla 4.10 el error relativo presenta un incremento conforme se disminuye el número de iteraciones en el algoritmo. El tiempo de ejecución por su parte muestra un decremento conforme número de iteraciones disminuye. Dado este comportamiento de ambos parámetros resulta difícil encontrar un punto de equilibrio entre estas dos unidades de medición. Sin embargo observamos que tanto el error relativo como el tiempo de ejecución llegan a un valor estable, a partir del cual no aumentan o disminuyen significativamente. La gráfica 4.10 nos sugiere que este punto está en un número de iteraciones entre 30 y 24.

6.1.1. Comparación exactitud y rapidez

Para este conjunto de pruebas se comparó el algoritmo desarrollado en el presente trabajo contra el implementado actualmente en el robot de servicio Justina. Reportado en el trabajo de tesis Jesus Cruz Navarro. [**REFFF].

Las pruebas se desarrollaron de la siguiente manera. Con la estructura de comunicación que permite ROS se implementaron dos servicios para encontrar planos: el desarrollado en este trabajo de tesis y el algoritmo ya implementado. Se obtuvo la información de profundidad con el sensor RGB-D Kinect está información de compartió a través de un tópico al cual ambos servicios se encontraban suscritos. De esta manera nos aseguramos de contar con la misma información en ambos algoritmos para poner a prueba la velocidad de ejecución y la precisión de algoritmo.

***Librería en C para medir obtener pulsos de reloj.

En cuanto a la medida de precisión del algoritmo continuamos suponiendo un plano horizontal del cual conocemos su altura; por tanto podemos conocer la ecuación del plano horizontal a esa altura. Probamos el algoritmo para ese modelo y observamos la cantidad de puntos que entran en ese modelo, tomando este resultado como el ideal. Posteriormente se pusieron en funcionamiento ambos algoritmos midiendo la cantidad de puntos en los modelos obtenidos y comparadolos con el número de puntos ideal. Este evento se iteró una cantidad aproximada de 80 veces.

Posteriormente calculamos el error relativo entre el modelo ideal y cada uno de los algoritmos. Como se muestran en la gráfica siguiente.

La tabla 6.1 resume los resultados obtenidos durante las pruebas.

Resultados algoritmo RANSAC		
Número de iteraciones: 1000		
Distancia mínima al modelo: 0.02[m]		
	Anterior	Actual
Tiempo promedio de ejecución	96.24[ms]	701.5[ms]
Error relativo promedio	39.95	8.78

Tabla 6.1: Comparación de resultados de RANSAC para planos.

Con la información de que se ha reflejado en la tabla 6.1 se puede deducir que la nueva implementación del algoritmo RANSAC con 1000 iteraciones y una distancia mínima al modelo de 0.02[m] es más lenta pero con menor error relativo. La diferencia de 605[ms] puede llegar a ser significativa si se requiere ejecutar el algoritmo iterativamente, sin embargo el común de las pruebas en ambientes del hogar no suelen requerir este tipo de acciones.

6.2. Extracción de objetos y sus características

En lo que respecta a la extracción de objetos y sus características se procedió a realizar una caracterización de la misma. Para ello se realizaron un total de 100 eventos para cada uno de los 5 objetos diferentes: un control para videojuegos de forma irregular, una caja de cereal, un envase de jugo, un envase de bebida láctea y una barra de chocolate. Como información de interés se compararon las medidas de altura de los objetos. Puesto que el algoritmo previo también hacía una estimación de la altura de los objetos se compararon los resultados de ambos algoritmos. Como elementos de medida significativos se tomaron medida de tendencia central (valor esperado del dentroide) y como medida de dispersión se tomó la varianza. A continuación se presentan los resultados obtenidos de las mediciones realizadas.



Figura 6.9: Fotografia de los objetos utilizados en las pruebas de cálculo de alturas y de manipulación de objetos.

6.2.1. Estimación de alturas

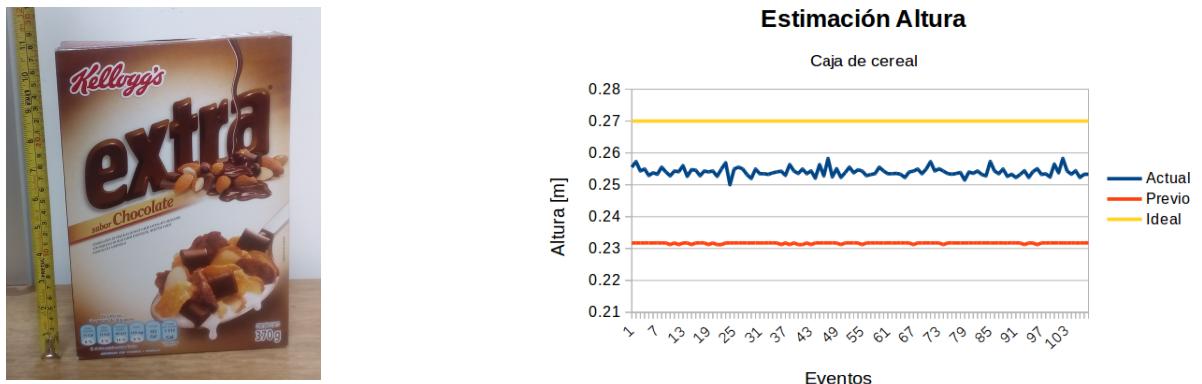


Figura 6.10: Gráficas de estimaciones de alturas para una caja de cereal. La altura real del objeto (amarillo), la altura estimada con el algoritmo previo (rojo) y la estimación actual (azul).

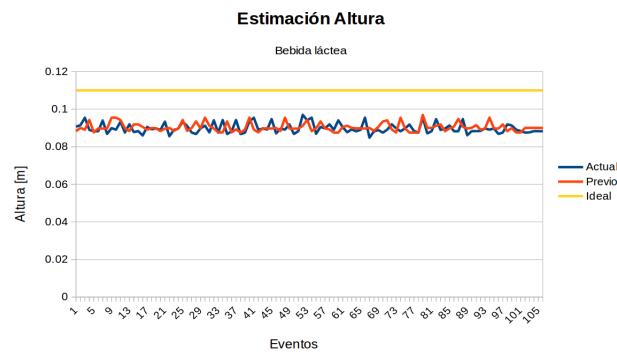


Figura 6.11: Gráficas de estimaciones de alturas para un envase de leche. La altura real del objeto (amarillo), la altura estimada con el algoritmo previo (rojo) y la estimación actual (azul).

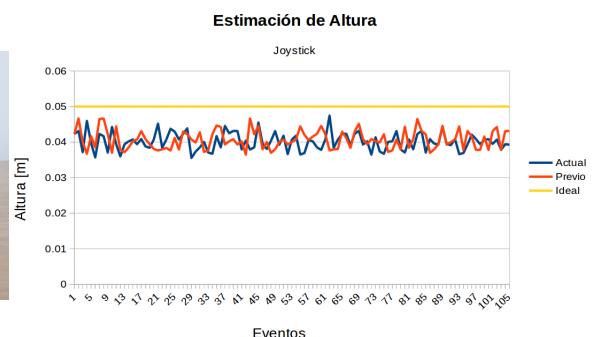


Figura 6.12: Gráficas de estimaciones de alturas para un control de videojuegos. La altura real del objeto (amarillo), la altura estimada con el algoritmo previo (rojo) y la estimación actual (azul).

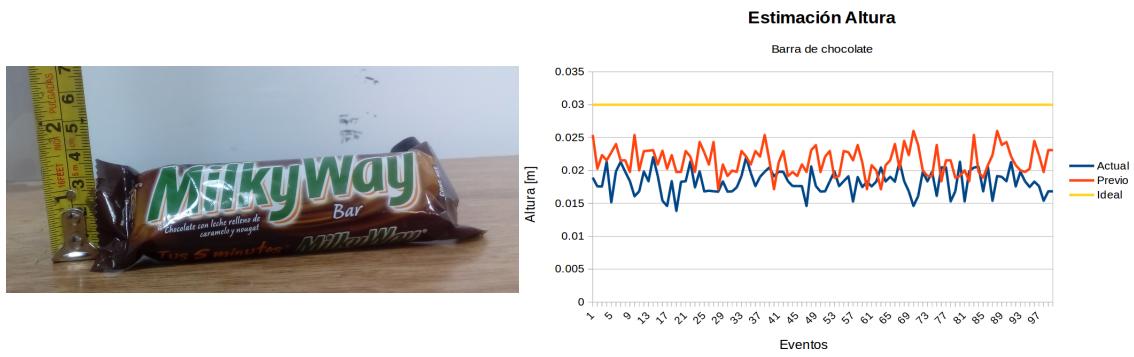


Figura 6.13: Gráficas de estimaciones de alturas para una barra de chocolate. La altura real del objeto (amarillo), la altura estimada con el algoritmo previo (rojo) y la estimación actual (azul).

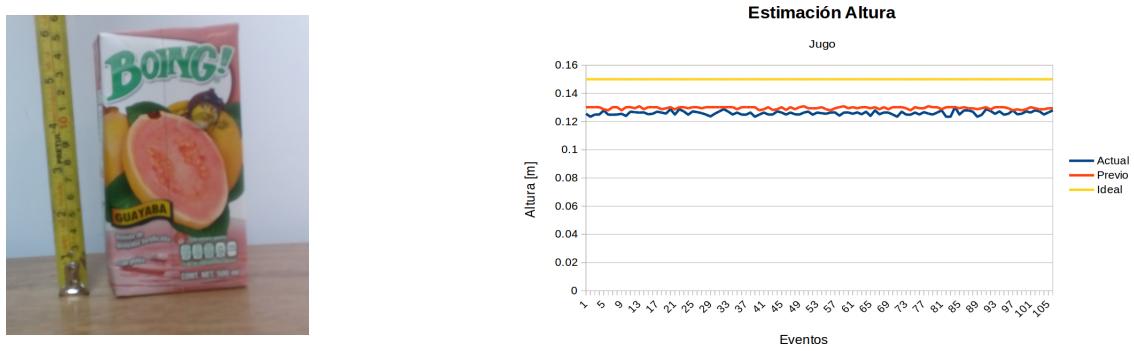


Figura 6.14: Gráficas de estimaciones de alturas para un envase de jugo. La altura real del objeto (amarillo), la altura estimada con el algoritmo previo (rojo) y la estimación actual (azul).

6.2.2. Adición de la información de dimensiones de los objetos

6.3. Cálculo de la orientación del objeto.

6.3.1. Prueba de exactitud

6.4. Estimación de las dimensiones del área de trabajo.

6.4.1. Comparación en tiempo de ejecución de la tarea de manipulación con información del área de trabajo.

6.5. Pruebas de manipulación con el robot real

6.5.1. Pruebas de manipulación actual.

Las pruebas se realizaron en 10 eventos para cada uno de los 5 diferentes objetos.

4 de ellos se realizaron con el objeto a 0 grados respecto al eje y del robot.

2 ocasiones el objeto se encontraba a 45° respecto al eje y del robot.

2 ocasiones el objeto se encontraba a -45° respecto al eje y del robot.

2 ocasiones el objeto se encontraba a 90° respecto al eje y del robot.

Esto para cada uno de los algoritmos con los cuales se cuenta.

****Gráficas de eventos, resaltando exitos-fracacsos

6.5.2. Pruebas de manipulación con información de la orientación.

Las pruebas se realizaron en 10 eventos para cada uno de los 5 diferentes objetos.

4 de ellos se realizaron con el objeto a 0 grados respecto al eje y del robot.

2 ocasiones el objeto se encontraba a 45° respecto al eje y del robot.

2 ocasiones el objeto se encontraba a -45° respecto al eje y del robot.

2 ocasiones el objeto se encontraba a 90° respecto al eje y del robot.

Esto para cada uno de los algoritmos con los cuales se cuenta.

****Gráficas de eventos, reslatando exitos-fracacsos

6.5.3. Pruebas de manipulación con información de la orientación e información de dimensiones..

Las pruebas se realizaron en 10 eventos para cada uno de los 5 diferentes objetos.

4 de ellos se realizaron con el objeto a 0 grados respecto al eje y del robot.

2 ocasiones el objeto se encontraba a 45° respecto al eje y del robot.

2 ocasiones el objeto se encontraba a -45° respecto al eje y del robot.

2 ocasiones el objeto se encontraba a 90° respecto al eje y del robot.

Esto para cada uno de los algoritmos con los cuales se cuenta.

****Gráficas de eventos, reslatando exitos-fracacsos

Capítulo 7

Conclusiones

Partiendo de la información obtenida de los resultados podemos concluir que un algoritmo RANSAC con un umbral de 0.02 [m] y un número de 1000 iteraciones nos ayudará a encontrar la ecuación de un plano así como una lista de puntos pertenecientes al mismo. Esta impletenación tomará 8 veces más tiempo que la implementación actual pero reducirá el error relativo respecto al modelo real de un 39.9% al 8.83%.

Bibliografía

- [1] W. Khalil and E. Dombre, *Modeling, identification and control of robots*. Butterworth-Heinemann, 2004.
- [2] “Sitio electronico oficial de la robocup at home.” <http://www.robocupathome.org/>. Consultado: 8-2017.
- [3] “Sitio electronico de la federación mexicana de robótica.” <https://www.femexrobotica.org/tmr2016/rctm-at-home>. Consultado: 8-2017.
- [4] J. M. Evans Jr, C. F. Weiman, and S. J. King, “Visual navigation and obstacle avoidance structured light system,” 4 1990. US Patent 4,954,962.
- [5] H. Endres, W. Feiten, and G. Lawitzky, “Field test of a navigation system: Autonomous cleaning in supermarkets,” in *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on*, vol. 2, pp. 1779–1781, IEEE, 1998.
- [6] “Pagina principal de Ros.” <http://www.ros.org/>. Consultado: 10-2016.
- [7] “Robot Carnegie Mellon herramientas de navegación.” <http://carmen.sourceforge.net/>. Consultado: 10-2016.
- [8] “Página principal universidad Carnegie Mellon.” <http://www.cmu.edu/>. Consultado: 1-2017.

- [9] S. Balakirsky, C. Scrapper, S. Carpin, and M. Lewis, “Usarsim: providing a framework for multirobot performance evaluation,” in *Proceedings of PerMIS*, vol. 2006, 2006.
- [10] “Simulador gráfico rViz.” <http://wiki.ros.org/rviz>. Consultado: 11-2016.
- [11] “Simulador gráfico Gazebo.” <http://gazebosim.org/>. Consultado: 11-2016.
- [12] “Biblioteca abierta visión computacional.” <http://sourceforge.net/projects/opencv/>. Consultado: 10-2016.
- [13] G. R. Bradski and V. Pisarevsky, “Intel’s computer vision library: applications in calibration, stereo segmentation, tracking, gesture, face and object recognition,” in *Computer Vision and Pattern Recognition, 2000. Proceedings. IEEE Conference on*, vol. 2, pp. 796–797, IEEE, 2000.
- [14] T. Wisspeintner and W. Nowak, *VolksBot-A Construction Kit for Multi-purpose Robot Prototyping*. INTECH Open Access Publisher, 2007.
- [15] “ActivRobots.” <http://www.activrobots.com>. Consultado: 10-2016.
- [16] “Robot de plataforma Standar Pepper.” <https://www.softbankrobotics.com/en/cool-robots/pepper>. Consultado: 11-2016.
- [17] “Robot de plataforma Standar Asimo.” <http://asimo.honda.com/>. Consultado: 11-2016.
- [18] A. O. Baturone, *Robótica: manipuladores y robots móviles*. Marcombo, 2005.
- [19] M. W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot dynamics and control*. John Wiley & Sons, 2008.

- [20] J.-J. Hernandez-Lopez, A.-L. Quintanilla-Olvera, J.-L. López-Ramírez, F.-J. Rangel-Butanda, M.-A. Ibarra-Manzano, and D.-L. Almanza-Ojeda, “Detecting objects using color and depth segmentation with kinect sensor,” *Procedia Technology*, vol. 3, pp. 196–204, 2012.
- [21] Z. Zhang, “Microsoft kinect sensor and its effect,” *IEEE multimedia*, vol. 19, no. 2, pp. 4–10, 2012.
- [22] “Sitio electronico oficial robotis.” <http://www.robotis.us/dynamixel/>. Consultado: 8-2017.
- [23] S. Chitta, I. Sucan, and S. Cousins, “Moveit![ros topics],” *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 19, no. 1, pp. 18–19, 2012.